

3. 4. 53. 1
—
ГЛ. 2210²1

S.VI. p.117

N. 64

3.1. 534
P. 2181

DI

ÉLÉMENTS
DE
PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE
ET DE
MÉTÉOROLOGIE.

BRUXELLES. — IMPRIMERIE DE E. LAURENT.

3. 1. 354
11
ÉLÉMENTS

DE

PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE

ET DE

MÉTÉOROLOGIE,

PAR M. POUILLET,

PROFESSEUR DE PHYSIQUE A LA FACULTÉ DES SCIENCES ET A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE ; MEMBRE DE LA SOCIÉTÉ
PHILOSOPHIQUE, DU CONSEIL DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT, ETC.

OUVRAGE ADOPTÉ PAR LE COMITÉ ROYAL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE POUR L'ENSEIGNEMENT DANS LES ÉTABLISSEMENTS DE L'UNIVERSITÉ.

*Verus experientia ordo primo lumen accendit,
deinde per lumen iter demonstrat.*

BACON, Nov. Org.



BRUXELLES.

LOUIS HAUMAN ET COMP., LIBRAIRES.

—
1836.

AVERTISSEMENT

SUR LA PREMIÈRE ÉDITION.

Les leçons que nous donnons à la Faculté des Sciences, M. Gay-Lussac et moi, s'adressent à un grand concours d'auditeurs. Il n'y a jamais eu en France et il n'y a nulle part en Europe une chaire publique qui, par son institution, puisse servir d'une manière plus efficace à répandre dans la jeunesse les connaissances de la philosophie naturelle. L'Université prend un soin particulier d'étendre notre cabinet de physique et d'augmenter nos collections d'instrumens. C'est par ces moyens que nous pouvons, dans le cours d'une année, embrasser toutes les branches de la science et faire toutes les expériences fondamentales qui se rapportent à chacune d'elles. Les plus longs développemens ne suppléeraient pas à la seule inspection des appareils et des phénomènes qu'ils peuvent produire; c'est surtout en physique qu'il faut voir et toucher: quand les yeux sont frappés par l'expérience, le raisonnement a plus de prise pour frapper l'intelligence. Cependant, nos paroles sont comptées par le temps, nos déductions doivent être courtes et rapides; et c'est, pour ainsi dire, d'un seul trait que nous devons faire passer l'esprit, de la contemplation des faits les plus simples à la conception des idées les plus générales. Celui qui écoute saisit au premier instant; il aperçoit, suivant le degré d'attention qu'il y porte, tantôt une faible lueur, tantôt une vive lumière; mais bientôt les traces de la vérité se perdent ou se confondent. C'est à peu près comme un vaste paysage dont on voit l'arrangement et l'ensemble; si l'on passe rapidement ou si la vue se tourne vers un autre point de l'horizon, il est à craindre qu'une seconde image ne trouble ou n'efface la première. Un

simple dessin, une rapide esquisse suffit à l'esprit attentif pour réveiller ses souvenirs et rétablir l'ordre dont il avait été frappé.

Ces Éléments de Physique et de Météorologie sont à peu près le texte de mes leçons, et cependant ils n'en peuvent être qu'une esquisse. A plus forte raison ne peuvent-ils être qu'une imparfaite ébauche des leçons de M. Gay-Lussac, malgré tous les efforts que j'ai dû faire pour me rapprocher le plus possible de son plan et de sa méthode. Une foule de détails, de descriptions et de rapprochemens doivent être supprimés dans un livre, à moins de redoubler les longueurs et les embarras de style au milieu desquels la vérité a déjà tant de peine à percer. Les difficultés qui se présentent, pour composer un ouvrage élémentaire de physique, sont sans nombre; on en a trop de preuves, et sans doute elles m'auraient retenu si le zèle des auditeurs de la Faculté et l'empressement avec lequel ils accueillent mes leçons ne m'eussent fait un devoir de tenter un nouvel effort pour leur être utile : puisque ma vie est consacrée à la science et à l'enseignement, il faut bien accomplir ma tâche avec tout le soin et tout le dévouement dont je suis capable.

AVERTISSEMENT

SUR CETTE DEUXIÈME ÉDITION.

Il y a à peine huit mois que le dernier volume de la première édition est publié, et déjà le besoin d'une nouvelle édition se fait sentir. Cet accueil plein de bienveillance avec lequel on a reçu mon ouvrage m'imposait l'obligation de redoubler de soins et d'efforts pour offrir au public une deuxième édition qui représentât d'une manière simple et fidèle l'état actuel de la science.

Le plan général n'a éprouvé aucun changement : les nouvelles découvertes sont venues se classer d'elles-mêmes dans les divisions principales que j'avais adoptées pour la première édition. La méthode logique et expérimentale à laquelle je m'étais particulièrement attaché pour exposer dans leur ensemble tous les phénomènes et toutes les lois générales de la physique, a été accueillie avec trop d'indulgence pour qu'il me fût permis de la modifier. S'il est vrai que cette méthode, débarrassée des considérations et des formules mathématiques, rende la science accessible à tous les esprits, il est certain qu'elle fera naître des observateurs et par conséquent des découvertes ; car c'est par les recherches expérimentales que l'on découvre des faits nouveaux et non pas par les spéculations mathématiques.

Cette deuxième édition ne diffère donc de la première que par des corrections assez nombreuses et par d'importantes additions. J'indiquerai ici, comme ayant un haut degré d'intérêt et d'utilité, les savantes recherches de MM. Arago et Dulong sur la loi de Mariotte et sur la force élastique de la vapeur d'eau. Ces recherches, entreprises sur l'invitation de l'Académie des sciences, s'étendent jusqu'à des températures qui dépas-

sent tous les besoins actuels de l'industrie, et il est probable que le génie de la mécanique dans ses plus hardies conceptions ne pourra jamais atteindre ces limites pour des machines usuelles.

Plusieurs savans météorologistes m'ayant témoigné le désir qu'ils aient de trouver dans les *Éléments de Météorologie* qui terminent le quatrième volume le résultat des principales observations relatives au magnétisme terrestre, je me suis fait un devoir de consacrer un chapitre à ce vaste sujet. On y trouvera la belle carte de l'équateur magnétique construite par le capitaine Duperrey d'après ses observations, celles de M. De Blossville et celles du capitaine Sabine. Je regrette vivement de n'avoir pas pu resserrer dans d'assez étroites limites la discussion des intensités magnétiques et celle de toutes les inclinaisons connues jusqu'à ce jour, pour indiquer la trace actuelle des lignes sans inclinaison et le lieu probable des pôles magnétiques; mais j'ai du moins essayé de rapporter, avec quelques détails, tout ce que l'on sait maintenant de plus précis sur le phénomène des aurores boréales.

14 juillet 1831.

DE PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE

ET

DE MÉTÉOROLOGIE.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

CHAPITRE PREMIER.

DES PHÉNOMÈNES NATURELS. — DE L'ESPACE. — DU TEMPS. — DE LA MATIÈRE. — DES FORCES.
— DU MOUVEMENT. — DE L'INERTIE.

1. Les phénomènes naturels qui se produisent sur la terre, et ceux qui paraissent dans le ciel, nous offrent de vastes sujets de méditation : on les regarde, on les contemple, et l'on cherche à démêler dans leurs apparences variées des propriétés communes ou des vérités générales. Le désir de pénétrer dans un sujet si merveilleux nous emporte malgré nous; soyons libres un moment des soins et des distractions de la vie, et c'est sur le tableau des phénomènes de la nature que viennent se reposer nos regards : tantôt ils se portent sur l'ensemble et parcourent curieusement la vaste étendue de l'horizon, tantôt ils s'arrêtent sur un point, et suivent le cours d'un phénomène ou les périodes d'un mouvement. Nous sommes nés observateurs, et nous ce rapport tous les hommes sont physiciens. Mais en réfléchissant sur tant de choses diverses, nous prenons l'habitude de généraliser les résultats de nos réflexions; nous sortons des limites de ce que voient nos yeux et de ce qui se démontre de soi-même; nous voulons rapprocher les effets observés pour remonter jusqu'aux causes qui les produisent, et c'est alors que commence l'incertitude de nos jugemens; c'est alors que les bons esprits font voir toute leur puissance, et les autres toute leur faiblesse. Qu'y a-t-il de plus curieux pour l'histoire

de l'intelligence, que de suivre, à travers le développement des siècles, les idées singulières que les hommes se sont faites successivement sur les propriétés des corps, sur les éléments qui les composent, sur les principes et sur les causes qui agitent la matière, et qui maintiennent l'harmonie du monde? Quelle confusion d'hypothèses et d'erreurs, au milieu desquelles les hommes de génie ont jeté çà et là quelques vérités fécondes! Et même de notre temps, qu'y a-t-il de plus curieux que d'interroger les divers esprits, depuis les plus vulgaires jusqu'aux plus habiles, et d'entendre leurs idées sur les phénomènes de la nature, sur les effets de l'air et de l'atmosphère, sur l'équilibre des eaux tout autour de la terre, sur les effets sans nombre de la chaleur et de la lumière, sur la météorologie, sur la cause du tonnerre, par exemple, que l'on n'ose plus personifier, il est vrai, mais que plusieurs se représentent encore comme ayant une forme et un corps! Quelle variété d'images et de conceptions! quelle différence entre les hommes! quelle différence entre les peuples! On peut dire que dans une seule génération se retrouvent les pensées de tous les siècles; dans un esprit inculte, chez un peuple ignorant, toutes les erreurs avec tous les préjugés; dans un esprit cultivé, chez un peuple

éclairé, toutes les connaissances qui se sont transmises d'âge en âge, et toutes les lois générales auxquelles la raison ait pu s'élever.

La physique, qu'on appelle aussi la philosophie naturelle, n'est qu'une partie de ces connaissances, qui forment maintenant le domaine de l'intelligence; elle en est la partie philosophique et fondamentale. On a coutume de dire qu'elle a pour objet les propriétés des corps, et les actions qu'ils exercent à de grandes distances; c'est en effet ce qu'en on peut dire de plus simple, quand on veut absolument en dire quelque chose. Mais tenter de définir une science, c'est consacrer à être intelligible pour ceux qui ne savent pas au moins les premiers éléments de cette science; ainsi on nous permettra sans doute de commencer l'étude de la physique, plutôt par les notions générales sur lesquelles elle repose que par des définitions qui seraient nécessairement incomplètes.

3. *De L'espace.* — Nous concevons très facilement les longueurs et les distances; une longueur de six pieds est une chose qui nous est familière, et nous concevons avec la même facilité la distance qui nous sépare d'un point éloigné de l'horizon, ou encore celle qui se trouve entre nous et une étoile; et c'est la plus grande distance à laquelle la matière agit sur nous. Nous comprenons tous de la même manière les étendues en superficie, comme la surface d'un grand lac ou la surface de la mer, et les étendues en volume, comme un pied cube de marbre ou de pierre, le volume d'une maison en celui d'une montagne. Concevons donc un pied cube de marbre qui soit suspendu au milieu d'une masse d'eau; nous savons qu'il peut être déplacé, et qu'à l'instant l'eau vient remplir la place qu'il occupait; mais imaginons que l'eau n'y vienne pas, qu'elle soit arrêtée de quelque manière; ou plutôt concevons que le cube de marbre puisse être anéanti, qu'il ne reste de lui que ses six faces, et qu'elles soient capables de retenir l'eau exactement des six côtés différents. Ce volume où il n'y aurait plus de marbre, et où il n'y aurait point d'eau, ni aucune autre chose, c'est de l'espace, c'est l'espace qu'occupait le pied cube de marbre et que nous pouvons concevoir privé de toute matière. Quelques métaphysiciens l'appellent l'espace pur, et les physiciens l'appellent l'espace vide. Nous en avons limité l'étendue pour en avoir une idée plus juste; mais ce que nous disons d'un pied cube pourrait se dire d'un volume beaucoup plus grand. Nous pouvons concevoir qu'une montagne s'élève, depuis son sommet jusqu'à sa base, et notre esprit conserverait encore l'idée du volume ou de l'espace qu'elle occupait. Il en serait de même de tout le globe de la terre; et il ne faut pas plus d'effort pour concevoir le volume qu'il occupe, que pour concevoir le volume occupé par une bille de billard ou par un boulet de canon.

Au-dessus de nos têtes est l'atmosphère, et au-dessus de l'atmosphère est le vide du ciel. Notre

esprit peut s'élever aussi dans ces régions: il peut se fatiguer à les parcourir dans tous les sens; il rencontre, au milieu de ces espaces, des corps comme la terre, des astres sur lesquels il se repose; mais quelle distance les sépare, quel abîme est au-delà? Cette voûte du ciel n'est qu'une apparence; elle n'a rien de solide, et, fût-elle solide comme du diamant, notre esprit ne s'y arrête pas; il en pénètre la profondeur; il poursuit l'espace au-delà de cette voûte et au-delà des étoiles; il conçoit que toute limite est impossible; il embrasse l'immensité, et conçoit quelque chose de plus grand. Ainsi l'espace est indéfini pour nos conceptions, et, par conséquent, infini dans la réalité.

Une portion finie de l'espace est dans notre langage ce que nous appelons l'étendue; mais il arrive souvent que l'on dit, l'espace d'un pied cube, au lieu de dire l'étendue d'un pied cube. Il n'en résulte aucune confusion pour les discussions physiques.

3. *Du temps.* — On dit communément que l'homme, à l'aspect des phénomènes naturels, prend l'idée de succession et celle de temps. Ainsi, dit-on, le printemps succède à l'hiver, et le jour à la nuit; voilà l'idée de succession: l'eau qui coule succède à l'eau qui s'est écoulée, le flux de la mer succède au reflux; voilà l'image du temps. Mais il n'est besoin ni de phénomènes extérieurs, ni d'aucune affection des sens pour que nous ayons présentement l'idée du temps: nous pensons, et nous avons la conscience de nos pensées; nous pensons successivement, et nous avons l'idée de succession et de continuité. Sans doute, ce phénomène intérieur ne nous permet de compter ni les heures, ni les jours, ni les années; mais avoir l'idée du temps et avoir le moyen de le mesurer sont deux choses différentes. Tous les mouvements extérieurs pourraient être suspendus, les astres pourraient cesser de tourner, les nuages pourraient être immobiles, l'eau cesser de couler; et cependant, au milieu de ce repos universel, nous aurions encore que le temps se peut subdiviser, bien que nous n'eussions plus aucune mesure de ces subdivisions.

L'idée du temps et celle de l'espace se retrouvent dans toutes nos perceptions et dans toutes nos idées; le néant est incompréhensible pour nous, ou plutôt, quand nous essayons de le comprendre, nous ne comprenons autre chose que l'espace et le temps.

4. *De la Matière et des divers états des corps.* — L'idée d'espace est une idée complète qui se suffit à elle-même, c'est-à-dire que nous pouvons concevoir l'espace et rien dans cet espace; mais elle n'est point une idée exclusive avec laquelle rien ne se puisse associer. Dans l'espace, nous pouvons concevoir l'im-pénétrabilité, et l'im-pénétrabilité c'est la matière. On n'a pas raison de dire que la matière a deux propriétés essentielles: l'étendue et l'im-pénétrabilité; ce ne sont pas des propriétés, c'est

une définition. On conçoit l'impénétrabilité ; on l'appelle matière, et voilà tout.

Nous pouvons concevoir l'espace limité ou indéfini, et nous pouvons comprendre de même que l'impénétrabilité soit limitée ou indéfinie, qu'elle occupe un petit volume comme une goutte d'eau, ou un grand volume comme le globe de la terre. Ici se présente une autre idée fondamentale : nous pouvons concevoir que l'impénétrabilité soit continue et inséparable, ou bien qu'elle soit discontinue, et, par conséquent, séparable. L'impénétrabilité inséparable est ce qu'on appelle un *atome*. L'idée du grandeur ou du petitesse n'entre pour rien dans la conception d'un *atome*, non plus que l'idée de forme : on peut concevoir un *atome* très petit ou un *atome* grand comme une montagne ; on peut concevoir qu'il soit rond, carré, pointu, ou de toute autre forme bizarre que l'imagination se plaira à inventer. Seulement nous supposons bien que le monde entier n'est pas un grand *atome*, et que la matière n'est pas tout d'une pièce ; car la terre et la lune sont deux fragments séparés, et à la surface de la terre nous voyons que la matière en général se brise et se désunit : ce qui prouve assez, d'après notre définition, que la terre non plus n'est pas un *atome*. Sur le reste, c'est à l'expérience à nous instruire : s'il y a des *atomes* d'une grandeur sensible, nous les verrons et nous pourrions constater leur forme ; mais si tous les *atomes* de la matière sont tellement petits et ténués que l'expérience directe ne puisse pas nous les faire voir, alors nous serons fort embarrassés de prendre un parti, et nous trouverons qu'il est bien plus facile de concevoir les *atomes* que de prouver leur existence. C'est là précisément l'indécision dans laquelle se trouvent les physiciens et les chimistes : par aucun moyen on ne peut rendre un *atome* perceptible, et nos sens ne peuvent rien pour résoudre la question d'une manière directe. Cependant l'ensemble des phénomènes indique, sinon d'une manière certaine, du moins d'une manière très probable, que la matière n'est pas indéfiniment séparable en parties, qu'à un certain degré de petitesse, qui est bien au-dessous de ce que nos sens peuvent saisir, il y a de dernières parties qui sont absolument inséparables et qui sont de véritables *atomes*. Toutes les découvertes récentes semblent confirmer cette opinion, et c'est aujourd'hui celle qu'on adopte exclusivement. Elle est très commode en physique ; mais ce ne serait pas une raison de l'adopter, si d'ailleurs on ne prouvait pas qu'elle est la plus vraisemblable ; car on sait bien qu'en toutes choses les explications qui semblent les plus commodes ne sont pas toujours celles qui sont au fond les plus vraies.

Ainsi, nous admettons l'existence des *atomes*, comme une vérité fondamentale qui doit nous servir de guide dans nos recherches. Une réunion d'*atomes* est ce qu'on appelle un *corps*. Les *corps* auront en général un plus grand ou un plus petit

volume, suivant qu'ils seront composés d'un nombre d'*atomes* plus grand ou plus petit ; ils auront des apparences différentes, si les *atomes* sont diversement arrangés pour les composer ; ils auront une différence un peu plus marquée, si les *atomes* diffèrent par leur forme ou leur grandeur, et enfin ils pourront être essentiellement différents, s'il existe des *atomes* qui diffèrent par leur nature substantielle.

Dans un volume donné d'un *corps*, dans une boule d'or, par exemple, on ne suppose pas que tous les *atomes* soient arrangés de la même manière, et tous également distants les uns des autres ; mais on est conduit à supposer que plusieurs *atomes* sont groupés de manière à former ce qu'on nomme une *molécule*, une *particule*, et que les *molécules* sont groupées à leur tour pour donner au *corps* sa structure et son ensemble. Ainsi deux *molécules* ont en général bien plus de distance entre elles que n'en ont entre eux les *atomes* qui les composent. C'est là le sens propre qu'on attache à ces mots, *molécules* et *particules*, qui sont à peu près synonymes ; mais quelquefois on les prend dans un autre sens : comme quand on dit, les *molécules* des *corps* sont ébranlées par le choc, elles sont en vibration dans les *corps* sonores, elles sont dilatées par la chaleur, traversées par la lumière, etc. ; alors on ne veut plus parler strictement de chaque groupe d'*atomes* en particulier, mais on veut parler, d'une manière vague, de petites portions que l'on conçoit dans l'intérieur des *corps* et que l'on sépare par la pensée. Enfin, quand on brise un *corps*, on se sert encore des mots *molécules* et *particules* pour en désigner les plus petits fragments.

Nous n'observons que trois états différents dans tous les *corps* qui sont soumis à nos observations ; ils sont *solides*, comme les pierres, les métaux et les tissus organiques ; ils sont *liquides*, comme le mercure, l'eau, l'esprit-de-vin ou les fluides des *corps* vivants ; enfin ils sont *gazeux*, comme l'air. Les *liquides* et les *gases* se désignent quelquefois par un nom commun ; on les appelle des *fluides*. Une chose digne de remarque, c'est qu'un même *corps* peut être tantôt solide, comme la glace, tantôt liquide, comme l'eau, tantôt gazeux, comme la vapeur. Nous verrons dans quelles circonstances se produisent ces mutations ; pour le moment, il suffit de les indiquer, parce qu'elles sont connues de tout le monde, et parce qu'en y réfléchissant on habitude l'esprit à pénétrer dans l'intérieur des *corps* et à bien comprendre qu'ils ne sont que des assemblages ou des agglomérations d'*atomes* ; que ces *atomes* sont séparés les uns des autres, et maintenus à des distances plus ou moins grandes, et qu'enfin il est possible que, sans se toucher, ils agissent du concert, et se communiquent des pressions ou des mouvements.

5. *Des Forces*. — Les *atomes* simplement posés à côté les uns des autres ne pourraient constituer

ni les corps solides, ni les autres corps de la nature; ils ne feraient tout au plus qu'un amas incohérent et instable, pareil à un mouceau de sable ou de poussière. Une pierre ou un morceau de fer sont des corps solides et résistans : il faut donc qu'il y ait *quelque chose* qui retienne les atomes, qui les attache l'un à l'autre, qui les fixe à leur place. Les corps se briseraient sans effort, s'il n'y avait que des atomes simplement juxtaposés, eu plutôt il n'existerait pas de corps; il n'existerait que de la poussière. Nous concevons que dans un morceau de fer un atome quelconque est pressé contre les atomes voisins comme un bloc de pierre est pressé contre le sol; pour soulever la pierre il faut un certain effort; pour arracher l'atome si on pouvait le saisir, il faudrait aussi un effort plus ou moins grand. Ces pressions sont des effets qui pourraient ne pas être et qui supposent par conséquent qu'il y a des causes pour les produire. Ces causes, quoique très différentes dans leur nature, sont ce que l'on appelle en général des *forces*.

Ainsi, il y a des forces qui agissent sur les atomes de fer, qui les pressent les uns contre les autres, qui les retiennent en leur lieu, et qui donnent à la masse cette fixité que nous observons. De même, il y a des forces qui agissent sur les molécules de tous les corps solides et qui leur donnent, à l'intérieur, une structure déterminée, et à l'extérieur une forme permanente. Enfin, comme il n'y a pas de corps qui n'ait une certaine manière d'être, et une certaine dépendance entre ses parties, on en conclut que, là où il se trouve plusieurs atomes voisins, il y a toujours entre eux une action mutuelle, par laquelle ils se sollicitent les uns les autres et prennent un arrangement déterminé.

Les liquides, qui sont si mobiles, ont eux-mêmes cette dépendance entre toutes leurs parties voisines : une goutte d'eau a toujours une forme particulière, soit qu'on l'observe sur quelque surface, ou plutôt sur les plantes où elle se dépose en rosée; soit qu'on l'observe aux extrémités des corps où elle se tient suspendue. Cette forme qu'elle prend est le résultat de l'action de ses molécules, car sans actions mutuelles, elles resteraient séparées et tomberaient isolément.

L'air, qui est invisible et qui est si subtil, n'est pas une exception à cette loi générale. Il est impénétrable, puisqu'il résiste quand il est enfermé dans une vessie, dans un ballon ou dans un autre espace quelconque. Donc il est aussi composé d'atomes et de molécules; donc ses diverses parties exercent aussi une action mutuelle les uns sur les autres : entre mille phénomènes qui en sont la preuve, nous citerons seulement le phénomène de la respiration, que tout le monde peut observer. L'air extérieur pénètre dans les poumons, à mesure que la poitrine s'ouvre pour le recevoir; ainsi les molécules du dehors agissent sur les molécules du dedans, elles les pressent et les forcent d'entrer; et, quand l'air est enfermé dans la poitrine,

les molécules intérieures réagissent aussi les unes sur les autres, pour en remplir toute la capacité, comme elles réagissent les unes sur les autres, pour se répandre dans toute l'étendue d'un vase, quelque petit ou quelque grand qu'il soit. Ces forces, qui agissent sans cesse dans l'intérieur d'un corps entre toutes les molécules voisines, ou entre tous les atomes qui composent une molécule, s'appellent *forces moléculaires*, ou *attractions moléculaires*; il serait mieux de les appeler *actions moléculaires*, ou *forces atomistiques*, ou *forces constitutives* des corps, puisqu'en effet ce sont ces forces qui donnent aux corps leurs constitutions particulières et leurs modes d'existence. Nous examinerons plus tard s'il n'y a qu'une seule force de cette nature, ou s'il y en a plusieurs qui se combattent, qui se balancent, et qui sont tour à tour plus grandes ou plus petites.

Outre les forces moléculaires, il y a des forces d'une autre nature : les corps tombent d'eux-mêmes, quand en les abandonne; les rivières coulent sans cesse; le soleil semble tourner autour de la terre : voilà des *mouvements* que nous observons, et nous jugeons dans notre pensée que la matière pourrait exister sans que ces mouvements fussent produits. Ils ne sont donc que des effets accidentels dus à des causes déterminées. Ces causes du déplacement des corps ou des *mouvements de translation* s'appellent aussi des *forces* ou des *puissances*. Elles ont sans doute des rapports avec les forces moléculaires, qui peuvent aussi, dans certains cas, imprimer des mouvements de translation; mais en général on les distingue, comme nous le verrons plus loin.

6. *Du Repos et du Mouvement.* — Les idées de *repos* et de *mouvement* sont, comme l'idée d'impénétrabilité, des conceptions simples et primitives, qui ne peuvent ni se décomposer ni se définir. On conçoit le repos, on conçoit le mouvement, on peut aider un esprit à comprendre ces choses d'une manière plus générale ou plus féconde; mais dans aucune langue on ne peut les expliquer ni l'une ni l'autre que par des mots équivalens. Dès que nous avons l'idée d'espace et l'idée de nous-mêmes, nous nous prenons pour un centre autour duquel l'espace indéfini se développe, et nous avons l'idée de direction, de distance et de situations respectives. Nous avons besoin de l'aspect du ciel pour nous *orienter* par rapport au soleil et aux autres; mais nous n'avons besoin que du sentiment de nous-mêmes pour nous *orienter* par rapport à nous : à moins de tout confondre, nous ne confondons pas l'espace qui est devant nous avec l'espace qui est au-dessus de nos têtes ou sous nos pieds, ni celui qui est à droite avec celui qui est à gauche. L'homme qui a vécu dans les ténèbres, soit à la surface de la terre, soit au fond des mines, ne sait ce que c'est que l'orient, l'occident ou les pôles du monde, toutes choses qui se rapportent à l'aspect du ciel qu'il ne connaît pas; cependant il conçoit l'espace, et par la pensée il le sépare en diverses

régions qui ont rapport à lui-même ; en régions latérales antérieures et postérieures, et en régions hautes ou régions basses. Nous pouvons tous faire abstraction de la matière sans pouvoir jamais faire abstraction de nous-mêmes ; et, une fois que nous avons de la sorte pris possession de l'espace, nous pouvons comprendre que rien ne change plus ni en nous ni autour de nous : nous avons alors l'idée de *repos* et de *repos absolu* ; car on appelle *repos absolu* d'un corps la persistance réelle de ce corps dans le même lieu de l'espace. De même, nous pouvons comprendre qu'il arrive un changement de place ; nous pouvons comprendre que nous avançons ou que nous reculons dans uno de ces régions idéales ; que nous allons d'un côté ou de l'autre ; que nous montons ou que nous descendons : alors nous avons l'idée du *mouvement* et l'idée de *mouvement absolu* ; car on appelle *mouvement absolu* d'un corps le déplacement réel de ce corps dans l'espace. Il y a deux choses essentielles à considérer dans le mouvement : sa direction et sa lenteur ou sa rapidité, qu'il ne faut pas confondre avec sa vitesse dont nous parlerons plus loin. Si le *mobile*, ou le corps qui se meut, parcourt une ligne droite, le mouvement est dit *rectiligne*, et la droite parcourue par le mobile est la direction du mouvement ; au contraire, si le mobile parcourt une courbe quelconque, le mouvement est dit *curviligne*, et l'on dit encore que la courbe qu'il parcourt est en général la direction du mouvement. Mais dans ce dernier cas, pour exprimer sa direction dans un instant quelconque, il faut remarquer qu'entre deux points d'une courbe, on peut mener une infinité de tangentes ou de lignes droites qui ne font que toucher la courbe ; alors le mobile étant en même temps sur la courbe et sur une tangente, on dit que la direction de son mouvement est celle de la tangente sur laquelle il se trouve. Ainsi, dans le mouvement curviligne, le mobile change à chaque instant de direction, et s'il parcourt un cercle entier, il a véritablement passé par toutes les directions possibles. Pour la lenteur et la rapidité du mouvement, on dit en mécanique, comme dans le langage ordinaire, qu'un mouvement est plus lent quand le mobile parcourt moins d'espace dans le même temps, et qu'il est plus rapide quand il parcourt un espace plus grand. Seulement il faut prendre garde que de deux mouvements donnés, celui qui serait le plus lent, en ne considérant que les espaces parcourus pendant une seconde par exemple, pourrait être le plus rapide, si l'on considérait les espaces parcourus pendant une heure ou pendant un jour ; car on conçoit qu'un même mouvement peut se ralentir avec le temps ou devenir plus rapide.

Le repos absolu et le mouvement absolu ne sont que des conceptions de notre esprit : dans l'arrangement du monde, il n'y a rien d'absolu pour nous ; tout est relatif et conditionnel. Ainsi, toutes les choses qui nous paraissent les plus immobiles à la

surface de la terre ne sont que dans un repos relatif. Les arbres sont en repos par rapport aux montagnes, et les montagnes sont en repos par rapport au sol et à la masse du globe ; mais les arbres et les montagnes sont emportés avec nous dans la vaste orbite de notre planète, et tous ensemble nous parcourons en une seconde dix fois plus d'espace que n'en parcourt dans le même temps un boulet qui sort du canon. Cependant, en parcourant aussi vite les espaces du ciel, nous ne pouvons pas juger de notre mouvement absolu, car il faudrait savoir si le soleil est immobile au centre du monde. Or, tout semble annoncer que le soleil emporte avec lui toutes les planètes, comme la terre emporte avec elle son atmosphère et ses nuages, ses arbres et ses montagnes. Le soleil lui-même n'est qu'une planète imperceptible, par rapport à un autre soleil autour duquel il tourne, et cet autre soleil est sans doute emporté lui-même dans l'espace, sans qu'on puisse assigner ni même imaginer un centre fixe autour duquel toutes ces révolutions s'accomplissent.

7. *De l'inertie.* — Il y a deux manières de concevoir les forces qui agissent sur la matière inorganique. On peut supposer qu'elles ont une existence séparée, qu'elles sont hors de la matière, et qu'elles en sont indépendantes ; ou bien on peut admettre qu'elles sont inhérentes à la matière elle-même, et qu'elles ne sont que des propriétés permanentes, qui lui ont été primitivement données. Ces deux suppositions reviennent au fond à une seule et même chose ; mais, quelle que soit l'idée qu'on puisse prendre de leur origine et de leur mode d'existence, il y a sur elles et sur la matière deux principes fondamentaux qui résultent de tous les phénomènes naturels qui se produisent à nos yeux, et qui se renouvellent ou se perpétuent depuis tant de siècles. Ces deux principes constituent ce qu'on appelle l'*inertie* de la matière. Le premier est que, toutes les forces qui agissent sur la matière cessant d'agir à un instant donné, la matière conserve son état de repos ou de mouvement. Le second est que toutes les forces sont soumises à des lois d'une infaillible stabilité. Il résulte du premier principe qu'un atome de matière ne peut ni se donner du mouvement ni altérer celui qu'il aurait reçu ; et si deux atomes de matière peuvent se donner du mouvement l'un à l'autre par leurs attractions, au en général par leurs actions mutuelles, comme l'attraction de la terre donne du mouvement à une pierre qu'on abandonne à elle-même, il résulte du second principe que ce mouvement se produit suivant une loi déterminée qui n'a éprouvé aucun changement depuis que le monde existe. Ainsi, tous les changements que subit la matière, soit dans son état, soit dans son repos, soit dans son mouvement, nous devons les attribuer à des causes ou à des forces particulières ; tantôt à des forces nouvelles qui surviennent tout à coup, tantôt à des forces permanentes qui continuent d'agir, et qui

règlent leurs actions suivant les lois immuables auxquelles elles sont soumises. Si un corps se brise ou se déplace, s'il devient plus dur ou plus mou, s'il se refroidit ou s'il s'échauffe, s'il se liquéfie ou s'il se vaporise, c'est qu'une cause est survenue qui lui imprime ces modifications. Jamais une pierre ne s'est brisée d'elle-même, jamais elle ne s'est soulevée sur le sol, jamais on ne l'a vue ni se durcir, ni se ramollir, ni s'échauffer, ni se refroidir, ni se liquéfier d'elle-même, ni disparaître en vapeurs. Si l'on coupe le fil qui soutient un corps, l'on le voit qui tombe et qui se précipite d'un mon-

vement de plus en plus rapide. Il fallait une cause pour le faire tomber, et c'est cette même cause qui continue d'agir et qui presse son mouvement par ses actions répétées. La terre, dans son orbite autour du soleil, éprouve des variations perpétuelles : tantôt sa course devient plus lente, tantôt plus rapide, et cependant rien n'est accidentel dans ces périodes; rien n'est fortuit ni imprévu. C'est toujours la même cause qui préside à ces mouvements; mais c'est une cause qui échange d'énergie, et c'est par la loi de ces changements que se maintient l'équilibre du monde.

CHAPITRE II.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.

DIVISIBILITÉ. — POROSITÉ. — COMPRESSIBILITÉ. — ÉLASTICITÉ. — DILATABILITÉ.

8. On appelle propriétés générales des corps celles qui sont communes à tous les corps, quel que soit l'état sous lequel ils se présentent. Celles de ces propriétés qu'il importe le plus de connaître dès le commencement de la physique sont :

- 1^o La divisibilité;
- 2^o La porosité;
- 3^o La compressibilité;
- 4^o L'élasticité;
- 5^o La dilatabilité.

On pourra remarquer qu'elles dépendent de la structure des corps et de l'arrangement intérieur de leurs parties constituantes. Si les corps n'étaient pas composés, ils ne seraient pas divisibles, ni poreux, ni compressibles, et ils ne pourraient pas non plus avoir le ressort qui constitue l'élasticité, ni la faculté d'augmenter de volume, qui constitue la dilatabilité. C'est pour cette raison qu'il ne serait pas exact de dire que ces propriétés sont des propriétés générales de la matière, car elles ne peuvent en aucune sorte appartenir aux atomes, tels que nous les pouvons comprendre et tels que nous les avons définis : ce sont des propriétés de l'ensemble, et non pas des propriétés des éléments.

9. *Divisibilité.* — Tous les corps peuvent être divisés en plusieurs parties, et ces parties elles-mêmes en parties de plus en plus petites, jusqu'à ce qu'enfin elles échappent à nos sens et à nos instrumens. Cette propriété, prise en général, est la chose du monde la plus connue : chacun sait que

les barres de métal se rompent sous un certain effort, que les pierres se cassent sous le marteau, et que le diamant, qui est le plus dur et le plus inaltérable des corps que l'on connaisse, peut être lui-même réduit en fines poussières qui servent à polir sa surface. Mais ce qui doit nous occuper, et ce qui a dû surtout exciter la curiosité des plus anciens observateurs, c'est de savoir si tous les corps sont en effet divisibles, et s'ils le sont tous jusqu'au dernier degré de petitesse que nous puissions percevoir.

Pour les corps qui sont liquides comme l'eau, il est évident qu'ils peuvent être divisés et subdivisés en particules si petites qu'elles soient à la fin tout ce que le toucher peut sentir de plus ténu et tout ce que l'œil peut voir de plus délié; car en les regardant nous ne voyons sur leur surface aucune sorte d'inégalité, et en plongeant la main dans leur masse nous ne pouvons pas palper leurs molécules et les sentir distinctement, comme nous sentirions des parcelles de sable.

Pour les solides, nous ne pouvons pas juger aussi facilement de la grosseur ou de la ténuité des dernières parties qui les composent. Rien ne nous indique d'avance que parmi ces corps il ne s'en trouve pas qui, étant divisés jusqu'à une certaine limite, se refusent à une division ultérieure, et dont les parties élémentaires, encore grosses et palpables, ou du moins très-perceptibles, ne pourraient plus être ni subdivisées davantage ni altérées en aucune manière. Aussi les anciens avaient eu grand

soin d'expérimenter, dans cette vue, sur tous les corps qu'ils connaissent; et les modernes, qui ont tiré du soin de la terre tant de substances nouvelles, les ont de même éprouvées pour savoir jusqu'à quel point elles se divisent. Ce n'est qu'après toutes ces expériences qu'il a été permis de conclure que pour tous les corps connus il n'y a aucune limite perceptible à la divisibilité. Cependant il ne serait pas rigoureux d'étendre cette conséquence à tous les corps qui existent : par cela seul qu'il a fallu l'expérience pour résoudre la question, la question n'est résolue rigoureusement que pour les corps sur lesquels on a expérimenté. Ainsi, il n'est pas impossible que les volcans fassent sortir un jour des entrailles de la terre quelques substances dont les atomes soient pour nous d'une grandeur perceptible, et peut-être de telles substances se trouvent fort communément dans la masse des autres planètes.

Dans l'impossibilité de reproduire toutes les expériences qui ont été faites sur tous les corps connus, nous devons nous borner à citer quelques-uns des exemples les plus frappants, pour montrer, d'une part, que nos sens ne peuvent atteindre qu'à un certain degré de petitesse, et, d'une autre part, que ces dernières parcelles qui commencent à nous échapper sont encore composées d'un nombre immense de parties distinctes.

C'est par le sens du toucher et par celui de la vue que nous jugeons de la grandeur des objets; le goût et l'odorat nous instruisent de leur présence, sans rien nous apprendre de leur forme; et ce qui est une chose digne de remarque, c'est que par le sens de l'ouïe, qui est chez les aveugles un instrument d'uno si merveilleuse délicatesse pour juger des distances, nous ne pourrions jamais nous élever à l'idée d'une figure déterminée, ni à l'idée de la grandeur, ni à celle de la petitesse.

Le sens du toucher est répandu dans tout le corps, soit à l'intérieur, soit à la surface; mais il s'exerce très-différemment dans les différentes parties. A l'intérieur, nous n'avons que des sensations vagues des corps étrangers qui nous touchent ou qui nous blessent : et dès que le contact est un peu prolongé, toute sensation locale disparaît; nous n'éprouvons plus qu'un sentiment général, une manière d'être plus ou moins douloureux, dont nous ne démentons ni le siège ni la cause. C'est sans doute par une raison sensible que nous ne sentons rien en dedans de nous-mêmes, ni les substances solides, comme les os, ni les substances liquides, comme le sang, même quand elles circulent avec une grande rapidité. A l'extérieur, tous les points de la surface peuvent sentir distinctement le contact des corps étrangers; mais c'est la main qui est le véritable organe du toucher; on sait que c'est par elle que nous prenons l'idée des contours et des formes géométriques des corps, et que c'est par elle aussi que nous pouvons percevoir les objets les plus déliés. Sur une surface polie, la main

exercée d'un aveugle peut sentir des grains de poussière d'une telle ténuité qu'il en faudrait des centaines rangées à côté l'un de l'autre pour faire la longueur d'une ligne. Une main moins délicate peut sentir distinctement un fil de laine ou un fil de soie d'un seul brin, et cependant ces fils n'ont pour l'ordinaire que les dimensions suivantes :

Diamètres en millimètres.

Laine ordinaire. 0^{mm},05 ou 5/100 de millimètre.
Mérinos. . . . 0^{mm},02 . . . 2/100 . .
Soie. 0^{mm},01 . . . 1/100 . .

La plupart des fourrures recherchées, comme le castor et l'hermine, ont une finesse qui est comprise entre le mérinos et la soie, et la plupart des laines de différentes espèces sont comprises entre le mérinos et la laine ordinaire. Ces filaments, qui ont une si grande finesse et qui sont à peu près les dernières grandeurs que le toucher puisse percevoir, sont cependant des corps très composés; chacun d'eux a une structure particulière que le sens de la vue peut seul nous faire connaître; chacun d'eux contient des éléments très divers, qui sont préparés par la nutrition, sécrétés par les organes, et que la chimie peut séparer de nouveau et remettre en évidence.

Le verre, qui est un produit de l'art, et dans la composition duquel il entre plusieurs substances différentes, peut être filé comme la soie. Pour en faire l'expérience, on prend un tube de verre assez fin, on le présente, vers le milieu de sa longueur, à la flamme d'une bougie, et quand il est chauffé dans cet endroit jusqu'au rouge-blanc, on tire les deux moitiés comme pour les séparer; alors il se fait entre elles un fil d'une brasse de longueur, qui a toute la finesse de la soie, et qui en a presque la souplesse, cependant ce filament de verre est encore assez épais pour former lui-même un tube ayant ses parois et son canal intérieur par lequel on peut faire passer des liquides.

Nous pourrions pousser bien plus loin les expériences sur notre sensibilité organique, si les corps ne devenaient pas trop flexibles à mesure qu'on les divise en filaments plus minces. Si, par exemple, un fil mille fois plus fin qu'un fil de soie pouvait avoir la rigidité d'une flèche, il serait curieux d'observer l'effet de ses piqures sur les divers points de la peau; on trouverait sans doute qu'une flèche de cette espèce pourrait nous traverser le corps de toutes parts, sans se faire sentir et sans troubler le moins du monde les fonctions de la vie.

Le poli que prennent les corps est une autre preuve de la divisibilité de la matière, et le contact des surfaces polies est une autre preuve de la limite des perceptions du toucher.

L'acier poli, les métaux, le diamant et les pierres précieuses ne sont pour la main qu'une seule et même chose; en les touchant nous ne sentons

qu'une surface géométrique, et cependant toutes ces superficies sont travaillées avec les fines poudres de l'émeri ou du diamant, et chaque grain de poussière y trace un sillon proportionné à sa grandeur; voilà des cavités et des saillies que le toucher ne peut plus sentir.

Les dernières parcelles de matière qui échappent au toucher sont encore perceptibles à la vue. L'œil aperçoit sur la pierre de touche les parcelles d'or qui servent à l'essai, et dont la main la plus délicate ne sentirait pas la présence. Les bulles de savon qui donnent de si brillantes couleurs sont de minces lames d'air, dont Newton a mesuré l'épaisseur. Auprès de leur sommet elles n'ont ordinairement que 1/10000 de millimètre, et elles se réduisent à 1/100000 quand elles laissent voir une tache noire quelques instans avant d'éclater. Les ailes transparentes des insectes n'ont qu'une épaisseur à peu près pareille, et c'est pour cette raison qu'elles brillent du même éclat. Enfin les pellicules de verre que l'on souffle à la lampe ont aussi la même ténuité et les mêmes couleurs; car c'est une loi générale que tous les corps transparents se colorent des plus vives nuances quand ils n'ont plus que quelques cent-millièmes de millimètre d'épaisseur; mais quand ils sont plus minces ils deviennent tout-à-fait invisibles. Une bulle de savon qui n'aurait que 1/1000000 de millimètre d'épaisseur ne pourrait être aperçue par aucun moyen, lors même qu'elle aurait un pied de diamètre.

Pour les corps qui ne s'étendent pas en surface, et qui ne sont grands que dans une seule dimension, comme les fils de métal ou les filamens organiques, il serait difficile d'assigner les limites de grandeur où l'on cesse de les voir nettement à l'œil nu. Ces limites dépendent de la perfection de l'organe et de l'éclat de la lumière; mais au moyen de loupes et de microscopes il n'est pas besoin d'être fort exercé ni d'avoir un organe très-parfait pour apercevoir d'une manière distincte des fils qui n'ont de diamètre que quelques millièmes de millimètre.

On sait que dans les arts on emploie des fils de cuivre, de fer ou d'argent qui sont aussi fins que des cheveux. La traction qu'on exerce pour les passer à la filière est ce qui limite leur finesse, parce qu'ils deviennent trop faibles pour y résister; mais par divers procédés ingénieux qui ne s'appliquent qu'à certains métaux, on parvient à faire des fils qui sont plus fins que la soie. Le docteur Wollaston a fait des fils de platine qui n'avaient que 1/1200 de millimètre d'épaisseur, c'est-à-dire qu'il faudrait plus de cent quarante de ces fils pour former un faisceau de la grosseur d'un fil de soie d'un seul brin. Quoique le platine soit le plus pesant de tous les corps connus, trois mille pieds de longueur d'un tel fil ne pèsent pas plus d'un grain. Pour arriver à ce résultat, qui paraît être le dernier terme que l'art puisse atteindre, le docteur Wollaston prend un fil de platine de 1/100 de pouce anglais d'épaisseur, qu'il fise dans l'axe d'un moule

cylindrique de 1/5 de pouce de diamètre; il remplit le moule d'argent en fusion, et il a ainsi un cylindre d'argent dont l'axe est en platine. En le faisant passer à la filière, les deux métaux s'allongent également et conservent leurs rapports d'épaisseurs; enfin, quand le fil composé est à son plus grand degré de finesse, on le fait bouillir dans l'acide nitrique, qui dissout l'enveloppe d'argent, et qui met à nu le fil de platine.

Puisque la matière peut s'amincir en superficie comme dans les bulles de savon ou les lames de verre, et se rétrécir en longueur comme dans les fils de platine, il est évident qu'elle peut s'atténuer de la même manière dans toutes les dimensions. Ainsi, nous pouvons juger que toutes les parcelles que nous apercevons encore sont des parcelles très composées. Mais le règne organique nous en offre des preuves encore plus frappantes. On sait maintenant d'une manière certaine que le sang n'est pas un liquide uniforme tel qu'il paraît à la vue, et que sa substance se compose d'une foule de petits globules flottant dans un liquide particulier qu'on appelle le *sérum*. Cette découverte a été faite à peu près à la même époque en Italie par Malpighi, et en Hollande par Leenwenhoeck vers 1660, environ quarante ans après que Harvey eût démontré la circulation du sang. Ces globules sont sphériques dans le sang de l'homme et dans celui des mammifères, et ils sont allongés dans les oiseaux et les poissons. Leurs dimensions varient suivant les espèces; dans la callitriche d'Afrique, ils sont les plus gros que l'on ait observés, et s'élevaient à 1/125 de millimètre; dans la chèvre, ils sont les plus petits, et ne vont qu'à 1/350. Les globules du sang de l'homme sont intermédiaires, et paraissent constamment de 1/150 de millimètre. On peut calculer d'après cette donnée qu'il y en a près d'un million dans la goutte de sang d'un millimètre cube, qui pourrait être suspendue à la pointe d'une aiguille. Dans presque tous les autres mammifères, les dimensions des globules paraissent comprises entre les deux dernières limites. Ces globules ne sont pas des atomes, car ils peuvent être brisés par des actions chimiques, et ensuite ils peuvent être reconstruits; et il n'y a aucun doute qu'ils ne donnent naissance à une multitude de parties distinctes quand ils passent dans la nutrition, car les fibres musculaires, et celles des autres tissus, se composent de globules très différens des globules du sang, et toujours beaucoup plus petits.

Enfin il y a des animaux complets qui sont aussi petits que les globules du sang et que les plus petites choses perceptibles. Nous pouvons les voir et les étudier; mais c'est le dernier terme où la vue puisse atteindre; ce qui est plus petit n'a plus de grandeur pour nos sens et n'a plus de mesure; c'est le commencement de l'indéfini en petitesse où se jette notre pensée, et qu'elle poursuit indéfiniment sans trouver un point où elle se doive arrêter.

Au-delà de ce dernier terme de sensibilité organique, tout cependant n'est pas hypothèse et conjecture; ces animales sont des êtres et des êtres essentiellement composés de parties; ils sont organisés, puisqu'ils ont la vie et le mouvement; ils sont pourvus du sens, puisqu'ils ont la force et l'instinct. Dans les fluides où ils vivent, ils exécutent, comme les poissons, des mouvements rapides et variés; ils se dirigent vers un but, ils évitent les obstacles, quelquefois même ils les surmontent; enfin ils ont besoin d'une proie, et ils savent la chercher et la saisir. Nous verrons en optique que, dans les dernières classes des êtres visibles, les mœurs ne sont pas moins curieuses à observer que dans les classes les plus apparentes; mais dès à présent nous pouvons conclure que, dans le petit tout impalpable qui compose un individu de cette espèce, il y a des choses distinctes, des parties molles et des parties solides, des espèces d'articulations pour les mouvements et des espèces de canaux pour les fluides; enfin qui parmi cette excessive petitesse, il y a une nutrition dans toutes les parties et une circulation nécessaires. Ainsi, le raisonnement poursuit encore la divisibilité de la matière, après que nos sens ne peuvent plus la constater; et comme l'ensemble des phénomènes de la chimie nous conduit à admettre l'existence des atomes, nous arrivons à cette conséquence définitive, que les atomes sont incomparablement plus petits que les dernières parcelles que nous pouvons saisir avec le sens le plus délicat aidé de l'instrument le plus parfait.

10. *Porosité*. — On appelle *pores* les intervalles qui se trouvent entre les diverses parties des corps. Les espèces de trous qu'on observe dans l'éponge ne sont autre chose que des pores d'une grande dimension; les mailles plus serrées, qui composent son tissu, sont des pores un peu plus petits; enfin, il se trouve encore, entre ces mailles et entre les fibres qui les composent, des interstices qu'on appelle aussi des pores, bien qu'ils soient d'une telle finesse qu'ils échappent à la vue. Ainsi, quand nous concevons une éponge d'un certain volume, d'un décimètre cube par exemple, nous pouvons par la pensée pénétrer dans sa structure intérieure, et distinguer, dans cette étendue totale, l'espace qui est occupé par les diverses fibres de l'éponge, et l'espace très-irrégulier et très-sinueux qui reste inoccupé; nous devons même concevoir que chaque fibre, fût-elle fine comme un fil d'araignée, est elle-même composée de parties distinctes, et que ces parties sont encore séparées les unes des autres, comme les fibres le sont entre elles.

Le volume, qui n'est occupé que par la substance propre d'un corps, est ce qu'on nomme le *volume réel*: l'espace apparent, qui est limité par sa forme extérieure, est ce que l'on nomme le *volume apparent*. Ainsi, le volume apparent diminué du volume réel est précisément le volume total de tous les pores pris ensemble. Quand on presse une

éponge, son volume apparent se rapproche de plus en plus de son volume réel; mais jamais on ne peut la presser au point de ne laisser aucun intervalle entre ses parties. Ainsi le volume réel est une chose que nous concevons très-facilement, mais que nous ne pouvons jamais trouver: c'est pourquoi, quand nous parlons d'un volume, c'est toujours du volume apparent. Ce que nous disons de l'éponge s'applique à tous les corps, quelle que soit leur nature, car nous avons vu par la divisibilité que tous sont composés de parties séparables et par conséquent de parties qui sont distantes les unes des autres; ainsi dans la réalité tous les corps sont faits comme des éponges. L'acier et le diamant, qui sont les corps les plus durs; l'or et le platine, qui sont les corps les plus compactes, ont aussi un volume apparent; il faut de même pénétrer par la pensée dans l'intérieur de leur masse, et voir entre les atomes qui les composent, des intervalles qui sont incomparablement plus grands que les atomes eux-mêmes.

En considérant la porosité dans ce sens le plus étendu, il est rigoureux de dire, comme on le dit d'ordinaire, que tous les corps sont poreux; mais si l'on n'entend parler que de la porosité au travers de laquelle on peut faire passer des liquides ou des gaz, il n'est pas vrai que tous les corps soient poreux, car il y en a au travers desquels on ne peut faire passer aucun fluide, quelque subtil qu'il soit. C'est cette porosité qui donne passage aux corps étrangers, qu'il nous importe de connaître en ce moment, et nous allons faire voir par des exemples et par des expériences qu'il y a beaucoup de corps, même des plus compactes, qui se laissent imbibir par les fluides.

Les tissus qui sont un produit de l'art, n'étant autre chose que des assemblages de fibres entrelacées, il n'est pas étonnant que ces fibres laissent entre elles des intervalles où puissent pénétrer les liquides, tels que l'eau, l'huile, l'alcool, etc. Aussi le papier, les feutres et les étoffes sont des corps dont tout le monde connaît la porosité. Il en est de même des corps réduits en poudre; il y a toujours, entre les fragments, des intervalles où pénétreraient les liquides; c'est pour cela qu'un monceau de sable est humide jusqu'à son sommet, et c'est aussi pour cela que le feu se conserve sous la cendre, car si l'air n'arrivait pas jusqu'au charbon, il s'éteindrait à l'instant.

Les filtres dont on se sert dans les opérations des arts et dans les expériences de chimie ne sont autre chose que des corps poreux, dont les pores sont assez grands pour laisser passer les liquides, et assez petits pour arrêter tous les corps étrangers qu'ils tiennent en suspension; c'est pour cela que les liquides filtrés sont parfaitement limpides: les filtres ordinaires sont le papier et le charbon.

Tous les tissus naturels, soit dans le règne végétal soit dans le règne animal, sont aussi très-poreux. Il n'est pas nécessaire de faire des expériences

ees pour le prouver : il suffit de remarquer qu'une plante, un arbre ou un animal, n'était à son origine qu'un embryon d'un très petit volume, car tous les germes sont petits; que ces corps se développent peu à peu, qu'ils vivent dans toutes les parties de l'intérieur, comme dans celles de l'extérieur, et qu'il faut bien que des fluides puissent circuler entre toutes les fibres pour y porter la nourriture et y entretenir la vie.

On peut dire qu'il y a des canaux particuliers pour cette circulation des fluides nutritifs et des autres fluides essentiels, et que dans la porosité des corps vivans il n'y a rien d'accidentel ni d'irrégulier. Sans doute, un animal ou un arbre ne sont pas l'ouvrage du hasard; leurs parties matérielles ne sont pas entassées d'une manière confuse, comme les parcelles d'un monceau de sable. Mais ce n'est pas le hasard non plus qui a fait les minéraux et les montagnes; leurs parties matérielles ont aussi un certain ordre, et la porosité, dans un cas comme dans l'autre, résulte de l'arrangement nécessaire que les forces donnoient à la matière.

Les corps organiques qui ont perdu la vie conservent encore cette disposition vasculaire; seulement les divers fluides, n'étant plus soumis aux forces particulières qui les dirigeaient, s'infiltrent indistinctement à travers tous les pores qui se présentent; tantôt ils s'exhalent, et le corps vivant se dessèche comme le bois, tantôt ils restent enfoncés et donnent naissance à une fermentation qui les détruit.

Le bois qui est plongé dans l'eau augmente de poids et de volume; celui qui reste dans l'air, soit dans les constructions, soit dans les ouvrages de menuiserie, se retire dans les temps secs et se gonfle dans les temps humides; tous ces effets résultent de sa porosité, qui est très grande, et on ne peut y remédier que par des peintures ou des vernis.

Les animaux et les bois pétrifiés sont une preuve frappante de la porosité, puisque la substance qui les pétrifie doit s'infiltrer au travers de la masse et pénétrer toutes les fibres.

Les substances minérales sont plus ou moins poreuses, suivant leur nature et suivant l'arrangement de la matière qui les compose. Les pierres qui sont opaques et celles dont les parties sont très-irrégulièrement arrangées, sont en général les plus poreuses.

La craie et toutes les pierres qu'on nomme calcaires, sont de même nature que le marbre; il n'y a de différence entre elles que dans l'arrangement des parties, et cela suffit pour que leur porosité soit très-différente. Lorsqu'on verse de l'eau sur un morceau de craie, elle est absorbée à l'instant et pénètre dans les pores; or, qu'on verse sur un morceau de marbre resté à sa surface et n'est point absorbée. De même si on jette un morceau de craie dans un verre d'eau, on voit une foule de petites

bulles qui s'élèvent, et si on y jette un morceau de marbre, on n'aperçoit rien de semblable. Ces bulles proviennent de l'air qui remplissait les pores de la craie, et que l'eau en chassait à mesure qu'elle y pénétrait. Si on en veut la preuve, il suffit de briser le morceau de craie qui a séjourné dans l'eau; on le trouve mouillé jusqu'au centre, tandis que le morceau de marbre est à peine mouillé au-dessous de sa surface. Ce n'est pas que le marbre ne puisse aussi à la longue s'imbiber d'eau; mais pour faire passer les liquides dans les corps qui ne sont guère poreux, il faut en général deux conditions, beaucoup de temps et beaucoup de pression; c'est pourquoi les pierres qu'on tire du fond des rivières ou du fond de la mer sont en général très humides, surtout si elles viennent d'une grande profondeur; car nous verrons qu'à trois ou quatre mille mètres au-dessous de la surface de l'eau les corps sont pressés par le poids supérieur du liquide, comme ils le seraient sous une très forte presse.

Parmi les pierres siliceuses, comme les agathes et les pierres à fossil, il s'en trouve une qu'on appelle *hydrophane*, dont la porosité se manifeste par un singulier phénomène. L'expérience en est curieuse; l'hydrophane, dans son état ordinaire, est demi-transparente; on la plonge un instant dans l'eau, et quand on l'en retire elle est presque aussi transparente que le verre. L'eau a pénétré sa masse comme l'huile pénètre le papier; les bulles d'air qui se dégagent, comme dans l'expérience de la craie, montrent le progrès de l'absorption : leur volume total est égal à celui des pores accessibles à l'eau; mais si on veut avoir ce volume avec plus d'exactitude, il suffit de peser l'hydrophane avant et après l'opération : la différence des poids sera le poids de l'eau absorbée, et il sera facile d'en conclure le volume.

Il y a beaucoup de phénomènes naturels par lesquels nous pouvons juger que les grandes masses minérales n'ont pas moins de porosité que les petites masses sur lesquelles nous pouvons expérimenter; ou sait, par exemple, que dans les grottes les plus profondes, l'eau s'infiltrait à travers les parois, et que c'est ainsi qu'elle vient déposer de toutes parts les stalactites, les stalagmites et toutes les autres cristallisations dont l'assemblage offre un spectacle si surprenant. On sait pareillement que les montagnes taillées à pic éprouvent chaque année une sorte d'exfoliation, dont la porosité est une des causes essentielles. Leurs flancs s'imbibent d'humidité, quand ils sont battus par la pluie ou par les vents humides, le froid de l'hiver congèle cette eau et augmente son volume; il en résulte une rupture d'adhérence dans toutes les couches superficielles, et quand vient le printemps, tous ces petits feuilletés se détachent peu à peu et tombent jusqu'à l'automne. C'est ainsi qu'au pied des grands escarpemens, s'entassent des conches à peu près de même épaisseur, dont on peut se servir en géologie pour remonter aux temps primitifs où les

montagnes ont pris la disposition qu'elles conservent aujourd'hui.

Enfin les métaux eux-mêmes donnent des preuves sensibles de porosité. Une boule d'or, remplie d'eau et soumise à une grande pression, laisse apercevoir, sur tous les points de sa surface, des gouttelettes semblables à celles de la rosée. Cette expérience fut faite, pour la première fois, en 1661, par les académiciens de Florence; elle a été depuis très souvent répétée avec des métaux différents, et toujours avec le même succès.

Il résulte de ces divers exemples de porosité, qu'un grand nombre de corps sont assez poreux pour se laisser pénétrer par les fluides, dès qu'ils sont en contact avec eux; qu'il y en a d'autres qui ne se laissent pénétrer qu'après un temps plus ou moins long, et sous une pression plus ou moins forte; enfin, qu'il s'en trouve, comme le verre, qui se laisseraient briser plutôt que de se laisser pénétrer. Il est à peine nécessaire de faire remarquer que tous les fluides ne sont pas également subtils pour pénétrer les corps; l'eau, l'alcool, l'éther, les diverses solutions acides ou alcalines ou d'une autre nature, le mercure, l'huile, le soufre fondu, l'air et les différents gaz, ne peuvent pas s'insinuer avec la même facilité entre les interstices des corps. Il est très heureux, pour les expériences, que le verre soit absolument imperméable à tous les fluides.

II. *Compressibilité.* — La compressibilité est la propriété qu'ont les corps de pouvoir être réduits à un moindre volume apparent.

On sait que les tissus très poreux sont en même temps très compressibles; l'éponge peut être réduite au tiers, au quart, ou même au dixième de son volume apparent. Le papier, les étoffes, le bois et tous les tissus qui se laissent pénétrer par les fluides peuvent pareillement diminuer de volume, et perdre par la compression les fluides qu'ils contiennent. Il y a une foule de procédés des arts qui ne sont que des applications de ce principe.

Les pierres elles-mêmes, quand elles sont chargées d'un grand poids, se laissent comprimer jusqu'à un certain point. Les bases des édifices et des colonnes qui en soutiennent la charge en donnent des preuves très évidentes.

Les métaux sont *écrouis* par la percussion; ils deviennent plus compactes; leurs parties se refoulent les unes sur les autres, et forment une masse plus serrée.

Les monnaies et les médailles reçoivent leurs empreintes sous l'action d'un balancier qui les frappe d'un seul coup; cette pression est si forte qu'elle façonne le métal comme la pression de la main pourrait façonner la cire : et non-seulement ils changent de forme, pour se mouler sur les traits les plus déliés de l'effigie que porte le coin, mais encore ils se compriment de telle sorte, que la pièce frappée a sensiblement moins de volume que celle qui ne l'est pas.

Les liquides sont en général beaucoup moins compressibles que les solides : l'eau ne diminue que très peu de volume, quand on l'enferme dans une pièce de canon dont les parois ont plus de trois pouces d'épaisseur, et qu'on la comprime par les plus fortes puissances. Le métal éclate avant qu'elle ne soit réduite aux 19/20 de son volume. Car nous verrons dans l'un des livres suivants qu'elle ne se comprime que de 48/1000000 pour chaque atmosphère, et qu'il ne faut pas mille atmosphères pour faire éclater un cylindre de bronze de trois pouces d'épaisseur.

L'air et les gaz sont de tous les corps ceux qui se compriment le plus facilement, et ceux qui se réduisent à un moindre volume. On peut le démontrer par un grand nombre d'expériences; mais l'une des plus simples est celle du briquet à air. Cet appareil se compose d'un tube de verre de huit ou dix pouces de longueur, et dont les parois sont très épaisses (Fig. 1); dans son intérieur, qui est parfaitement cylindrique, se meut un piston qui le ferme exactement, dans toutes les positions qu'il peut prendre. Si le tube était rempli d'eau, le piston ne pourrait pas descendre, puisque l'eau est très peu compressible; mais quand il est rempli d'air, la force de la main est suffisante pour enfoncer le piston et pour réduire le volume à la dixième ou même à la vingtième partie de ce qu'il était d'abord (Fig. 2). On sent que la résistance augmente à mesure que l'espace diminue, et qu'elle augmente de plus en plus; mais quelque effort que l'on puisse faire, on ne parviendrait jamais à pousser le piston jusqu'au fond, puisqu'il faudrait pour cela que l'air perdît son impenétrabilité, c'est-à-dire qu'il fût anéanti. Quand le piston reprend sa position primitive, l'air aussi reprend son volume primitif; ainsi il n'est pas compressible à la manière des métaux, qui reçoivent des empreintes, et qui ne reviennent pas à leur volume primitif quand le balancier cesse de les presser.

Les autres gaz ont la même propriété que l'air, et tous ces corps ne sont pas seulement propres à être comprimés, mais en vertu de leur force expansive, ils sont propres à prendre un volume beaucoup plus grand.

Si au-dessus du briquet à air on s'ajoutait un tube de même diamètre, et qu'on lieu d'enfoncer le piston on le soulevait dans ce nouveau tube (Fig. 3), l'air intérieur se répandrait partout, et prendrait un volume dix fois, cent fois, mille fois, etc., plus grand; et même il ne paraît pas qu'il y ait de limite à cette expansion des gaz. Après cela, on pourrait de nouveau enfoncer le piston, et le volume se réduirait de plus en plus; on pourrait le soulever de nouveau et l'enfoncer encore, et ainsi de suite, sans que l'air conservât la moindre trace des divers états de compression ou d'expansion par lesquels on l'aurait fait passer. C'est une constitution très remarquable, que celle de ces corps qui peuvent prendre ainsi un volume cent mille fois plus grand

ou cent mille fois plus petit, sans qu'une action mutuelle entre leurs molécules cesse de s'exercer.

D'après cela, on pensera peut-être que tout l'air de l'atmosphère pourrait être enfermé dans un très petit espace, comme par exemple dans la capacité d'un outo; mais nous verrons que, s'il n'y a pas de limite à l'expansion, il y a une limite nécessaire à la compression et à la réduction de volume.

12. *Élasticité.* — L'élasticité est la propriété qu'ont les corps de reprendre leur état primitif, quand on fait cesser la cause qui ébangeait leur forme ou leur volume.

L'air est parfaitement élastique : car si l'on presse une vessie à moitié pleine d'air, elle reprend toujours son état, dès qu'on cesse de la presser : pareillement, quand on a enfoncé le piston du briquet à air, il remonte de lui-même; l'air comprimé le soulève malgré le frottement, et le ramène vers le point de départ. Il en est toujours ainsi quand une cause quelconque agit sur un gaz; dès qu'elle cesse d'agir, le gaz revient exactement comme il était auparavant. C'est pour cela que les gaz s'appellent des *fluides élastiques*.

Les liquides qui ont été comprimés paraissent ne rien conserver non plus des pressions qu'ils ont supportées; ils reprennent leur volume à l'instant même où cesse l'action des causes comprimantes.

Il n'y a pas de corps solide qui soit aussi parfaitement élastique que les gaz et les liquides. Le caoutchouc, ou gomme élastique, est peut-être de tous celui qui a le plus d'élasticité; et cependant, soit par la chaleur, soit par de grandes compressions long-temps prolongées ou souvent répétées, on finit par changer sa forme ou son volume.

Toute imparfaite qu'elle est, l'élasticité des solides n'en est pas moins une propriété très importante et très curieuse à observer; nous l'examinerons fort en détail dans l'un des livres suivants. Ici nous nous contenterons de faire voir, par quelques expériences, qu'elle se manifeste à divers degrés dans les différens corps.

L'élasticité de l'ivoire est assez indiquée par les mouvemens singuliers des billes de billard; mais on peut la montrer plus directement par une expérience ingénieuse. On laisse tomber une bille ordinaire, ou une bille grosse seulement comme une balle, sur un plan très uni, où l'on a passé une légère couche d'huile; à l'instant elle se relève et rebondit jusqu'à la hauteur du point de départ, ou à très peu près. C'est là sans doute une preuve suffisante de son élasticité, et, par conséquent, de son changement de forme; mais si l'on regarde sur le plan, au point où elle a frappé, on y voit une empreinte d'autant plus large que le choc a été plus vif, et qui prouve d'une manière certaine que la bille ne s'est relevée qu'après s'être aplatie, comme serait une vessie pleine d'air, ou une bulle de savon; car ces bulles si légères peuvent aussi se réfléchir contre les corps et rejaillir sans se

rompre. Des balles de bois, de pierre, de verre ou de métal, se comportent à peu près comme les billes d'ivoire : toutes s'aplatissent plus ou moins avant de se relever, ce qui est une preuve de leur compressibilité; et toutes, quand elles n'ont pas été comprimées trop vivement, rebondissent et reprennent leur forme première, ce qui est une preuve de leur élasticité. Ainsi, dans le jeu des corps élastiques il y a un double phénomène, celui de la compression ou du changement de forme, et celui du rétablissement complet de toutes les parties. Une feuille de papier, ou même une feuille de plomb, ne sont pas des corps sans élasticité; car on peut leur donner de légères flexions, sans qu'elles se rompent et sans qu'elles cessent de reprendre leur position; mais si on les écarte un peu trop, leur élasticité est forcée, elles prennent le nouveau pli, et ne font plus d'effort pour en revenir.

L'élasticité résultant toujours d'un dérangement des molécules, soit qu'il ait lieu par pression ou par flexion, soit qu'il ait lieu par torsion ou par traction, l'on juge aisément qu'il y a, pour chaque corps, des limites à ces dérangemens, et, par conséquent, des limites à l'élasticité. Les corps sont d'autant plus élastiques que ces limites sont plus étendues; ainsi les billes d'ivoire sont plus élastiques que les balles de plomb, car elles reviennent d'une compression plus grande; les lames d'acier plus que celles de verre, car elles peuvent être bien plus fléchies; les fils de soie plus que ceux de cuivre ou d'argent, car ils peuvent être tordus bien davantage; et les cordes de violon plus que les fils de fer, car elles peuvent être bien plus étirées, sans cesser de revenir à leur première longueur. Mais si l'on ne fait éprouver aux molécules d'un corps que le dérangement que son état d'aggrégation peut permettre, elles reviennent toujours très exactement à leur position; et dans ce sens, on pourrait dire que tous les corps, les solides même, ont une élasticité parfaite.

13. *Dilatabilité.* — La dilatabilité est la propriété qu'ont les corps de changer du volume par l'influence de la chaleur, de s'agrandir quand on les chauffe, de se contracter quand on les refroidit, et de reprendre exactement les mêmes dimensions quand on les ramène exactement au même degré de chaud ou de froid.

L'air se dilate si facilement que la simple chaleur de la main augmente de beaucoup son volume. Pour en faire l'expérience, on prend un tube de verre très long, d'un diamètre intérieur de deux ou trois millimètres, et à l'extrémité duquel on a soufflé une bulle. On peut, au moyen de certaines précautions, y faire entrer une colonne de liquide coloré, qui se tiennent vers le milieu de la longueur du tube en *mm* (Fig. 4), et sépare l'air intérieur de l'air extérieur. Cela fait, quand cette colonne est en repos, on approche la main près de la bulle, et à l'instant on voit monter la colonne liquide; donc

l'air intérieur augmente de volume. Ensuite, en retirant la main, on voit la colonne qui retombe peu à peu, et qui revient enfin à sa première position; ce qui prouve qu'en reprenant le même degré de chaleur, l'air reprend aussi le même volume.

Pour faire la même expérience sur les liquides, on prend un tube semblable au précédent, que l'on remplit d'eau ou de mercure jusqu'au milieu de sa longueur en m (Fig. 5). Ensuite on chauffe la boule en la touchant avec la main, et la colonne monte de plus en plus jusqu'en m' ; au contraire, si on la touche avec de la glace, la colonne tombe en m'' ; et elle retourne encore à sa position primitive quand la glace est éloignée.

Pour les solides, l'expérience peut se faire de plusieurs manières : une des plus simples consiste à prendre une barre de métal qui s'ajuste très exactement entre deux talons, dressés à angle droit (Fig. 6) sur une plaque métallique assez épaisse. Si l'on fait rougir la barre, elle devient trop longue pour reprendre sa place, mais elle revient sur elle-même à mesure qu'elle se refroidit; et enfin quand elle n'a plus que la chaleur qu'elle

avait d'abord, elle a repris sa longueur primitive, et retombe entre les points fixes.

Ainsi tous les corps sont dilatables; et de tout ce qui peut changer en eux, leur volume est la chose la plus changeante. A chaque instant du jour ou de la nuit la chaleur varie, soit par l'action du soleil, soit par une foule d'autres causes; et tous les corps qui sont à la surface de la terre participent à ces variations. Ils sont tour à tour plus dilatés ou plus contractés, et n'ont jamais les dimensions fixes que nous leur supposons. C'est par un mouvement de toutes les parties de l'intérieur et de l'extérieur que se produisent ces alternatives; et, si la porosité nous fait voir que ces parties ne se touchent pas, la dilatation nous fait voir maintenant qu'elles ne sont jamais en repos et qu'elles ne gardent jamais ni les mêmes distances ni les mêmes positions relatives. D'où nous pouvons conclure enfin que la matière qui nous semble la plus inerte a une activité perpétuelle dans toute l'étendue de sa masse, parce que toutes ses molécules, soit au dehors soit au dedans, sont soumises à des causes qui agissent sans cesse, et qui peuvent sans cesse éprouver des changemens d'intensité.

CHAPITRE III.

DE L'ÉQUILIBRE ET DU MOUVEMENT.

NOTIONS DE STATIQUES.

14. Un corps est en *équilibre*, quand les forces qui le sollicitent se détruisent l'une l'autre, ou quand elles sont détruites par quelque résistance. Ainsi un corps est en équilibre à l'extrémité du fil qui le suspend, parce que la pesanteur, qui le sollicite, est détruite par la résistance du fil et par celle du point de suspension; si le fil n'est pas assez résistant, il se rompt et le corps tombe; si le point d'attache est mal assuré, le corps l'entraîne et tombe avec lui. Quelquefois l'équilibre a lieu sans point fixe et sans résistance apparente : les poissons les plus pesans sont en équilibre dans l'eau; un ballon avec ses agrès, sa nacelle, et les observateurs qu'il emporte, peut aussi être en équilibre dans les airs : mais alors la pesanteur qui sollicite ces corps est exactement détruite par des pressions particulières, comme nous le verrons dans un des chapitres suivans.

On peut dire que tous les corps qui nous paraissent

être en repos, ne sont en effet que des corps en équilibre; parce qu'ils sont toujours soumis à l'action de plusieurs forces qui se détruisent l'une l'autre.

La *Statique* a pour objet de déterminer les conditions de l'équilibre; et la *Dynamique* a pour objet de déterminer les lois des mouvemens qui se produisent quand les conditions d'équilibre ne sont pas remplies. La *Mécanique* comprend la Statique et la Dynamique, c'est-à-dire les lois de l'équilibre et celles du mouvement.

15. On ne peut mesurer les forces qu'en prenant pour unité une force convenue, comme on mesure les longueurs ou les poids, en prenant pour unité une longueur ou un poids déterminés. De plus, la notion de grandeur ne s'appliquant pas directement aux forces, il faut définir avec précision ce qu'on appelle *forces égales*, *forces doubles*, etc.

Pour que deux forces soient égales, il faut qu'elles

se fassent équilibre, lorsqu'on les oppose l'une à l'autre, sur un point, ou aux extrémités d'une droite inflexible. Deux forces égales donnent une force double quand on les ajoute, c'est-à-dire quand on les fait agir dans le même sens et dans la même direction; on aurait une force triple, si l'on faisait agir dans le même sens trois forces égales, et ainsi de suite.

D'après cela si l'on convient de représenter une force par un nombre ou par une ligne, la force double de celle-là sera représentée par un nombre double ou par une ligne double, etc. C'est ainsi que nous pouvons toujours représenter les forces par des grandeurs numériques ou linéaires, et faire sur elles les mêmes opérations que nous faisons sur ces grandeurs.

10. Quel que soit le nombre des forces qui agissent sur un point, et quelles que soient leurs directions, elles ne peuvent, en donner résultat, imprimer à ce point qu'un seul mouvement, dans une direction déterminée. Or, on conçoit qu'il existe une certaine force qui serait, à elle seule, capable de produire le même effet; et cette force unique qui pourrait remplacer l'ensemble de toutes les autres, est ce qu'on appelle leur *résultante*. Ainsi, quand un bateau se meut à la fois par la force du courant, par la force des rames et par celle du vent, on peut concevoir une force unique, ou fil assez fort, par exemple, qui, étant attaché au bateau, serait tiré dans une telle direction et avec un tel effort qu'à lui seul il lui imprimât à chaque instant le même mouvement que toutes ces forces réunies; il en serait la résultante. Le courant, le vent et les rames cessant d'agir, et le fil dont nous parlons leur étant substitué, rien ne serait changé quant au résultat.

L'ensemble des forces qui concourent à produire un effet se nomme un *système* de forces; ces forces s'appellent aussi des *composantes*, quand on les considère par rapport à la *résultante* qui pourrait les remplacer. Il est évident que, si à un système de forces on ajoutait une force nouvelle, qui fût égale à la résultante et dirigée en sens contraire, l'équilibre aurait lieu dans ce nouveau système de forces. C'est là la propriété caractéristique de la résultante.

Ainsi, dans l'exemple que nous avons choisi, tandis que les forces du courant, du vent et des rames exercent leur action, si l'on ajoutait un fil assez résistant, dirigé en sens contraire de celui qui représente la résultante et tiré avec le même effort, cette nouvelle force produirait l'équilibre. Le bateau serait plus fixé que s'il était à l'ancre; il ne pourrait avancer ni reculer, ni se mouvoir d'aucun côté, jusqu'à ce qu'il arrivât quelque force nouvelle, ou quelque changement dans les forces agissantes pour déranger l'effort par lequel elles se détruisent.

11. *Résultante de plusieurs forces qui agissent dans la même direction.* — Quand toutes les forces

qui agissent sur un point tendent à le mouvoir sur une même ligne, il peut se présenter deux cas : 1^o Si toutes ces forces agissent dans le même sens, la résultante est égale à leur somme; 2^o si elles agissent les unes dans un sens et les autres dans le sens opposé, la résultante est égale à la différence des deux résultantes partielles et agit dans le sens de la plus grande.

12. *Résultante de deux forces qui agissent angulairement sur un même point.* — Deux forces agissent sur le point A (Fig. 7), l'une dans la direction AX, et l'autre dans la direction AY; la première est représentée en grandeur par AF, et la deuxième par AF' : il est clair que le point A ne peut se mouvoir, ni suivant AF, ni suivant AF', et qu'il doit prendre une direction intermédiaire. C'est ce que le bon sens nous indique d'abord, mais c'est à peu près tout ce qu'il peut nous faire voir; car pour déterminer cette direction moyenne que doit prendre la résultante, et aussi l'intensité qu'elle doit avoir par rapport aux composantes, il faut recourir à des considérations que nous devons supprimer ici. Nous nous contenterons d'annoncer le principe général de la *composition des forces*, parce qu'il est très simple et très facile à comprendre. Voici en quoi il consiste. On construit le parallélogramme AFRF' sur les grandeurs des deux forces données et l'on mène la diagonale AR; cette diagonale représente à la fois la *grandeur* et la *direction* de la résultante. Ainsi le point A, sollicité par les deux forces AF et AF', est exactement dans le même cas que s'il était sollicité par une seule force, qui serait dirigée suivant AR, et qui aurait une grandeur égale à AR. Ce principe est vrai, pour les forces égales comme pour les forces inégales; pour celles qui font un angle droit ou obtus, comme pour celles qui font un angle aigu quelconque. C'est le principe fondamental de toute la statique. Il est connu sous le nom de *parallélogramme des forces*.

Quand les deux forces sont égales, la résultante divise toujours leur angle en deux parties égales; mais pour sa grandeur, elle est tantôt égale à celle des composantes, tantôt plus grande et tantôt plus petite (Fig. 8, 9 et 10).

Quand les deux forces sont inégales, la résultante divise leur angle en deux parties inégales, et elle est toujours plus rapprochée de la force la plus grande (Fig. 11).

13. Puisque deux forces peuvent être remplacées par une seule, réciproquement une seule force peut être remplacée par deux autres. On voit même qu'il y a une infinité de systèmes différents qui peuvent donner lieu à la même résultante (Fig. 12), et que réciproquement il y aura une infinité de manières de remplacer une seule force par le système des deux autres, quand on n'exige rien ni sur leur grandeur ni sur leur direction. Mais si l'on demande par exemple (Fig. 13) de remplacer la force AR par deux autres forces, dont l'une soit

dirigée suivant AY , et soit d'une grandeur AF' , alors le problème est déterminé, parce qu'il n'y a plus qu'une manière d'achever le parallélogramme et de trouver la composante AF .

20. *Résultante d'un nombre quelconque de forces agissant au même point.* — Quand on sait trouver la résultante de deux forces qui agissent au même point, on trouve aisément la résultante d'un nombre quelconque de forces; car on prend la résultante des deux premières, puis la résultante de cette résultante et de la troisième force, puis celle de cette nouvelle résultante et de la quatrième force, et ainsi de suite, en commençant à volonté par l'une ou par l'autre (Fig. 14).

21. *Résultante des forces parallèles.* — Quand deux forces parallèles AF et $A'F'$ (Fig. 15) agissent sur une ligne AA' , elles peuvent aussi être remplacées par une force unique qui est leur résultante, et dont on trouve l'intensité, la direction et le point d'application par les principes suivans :

1^o. La résultante des deux forces parallèles est égale à leur somme quand elles agissent dans le même sens, et à leur différence quand elles agissent en sens contraire.

2^o. Elle est parallèle aux composantes.

3^o. Elle est appliquée en un point G , tel que les distances GA et GA' soient en raison inverse des forces AF et $A'F'$. Ce point d'application de la résultante s'appelle le *centre des forces parallèles*. Une propriété remarquable de ce point, c'est qu'il reste le même quand les forces changent de direction absolue, en conservant leur parallélisme : car si les mêmes forces agissaient suivant AF , et suivant $A'F'$, leur résultante passerait encore par le point G , puisque les forces n'ayant point changé d'intensité, leurs grandeurs seraient encore en raison inverse des distances GA et GA' .

La résultante d'un nombre quelconque de forces parallèles se trouve en composant d'abord les deux premières, puis leur résultante avec la troisième, et ainsi de suite.

22. *Des Couples.* — Deux forces égales, parallèles et opposées forment ce qu'on appelle un *couple*. D'après ce que nous venons de dire, la résultante d'un couple est égale à zéro, et cependant le système n'est pas en équilibre; c'est un des cas très particuliers où deux forces ne peuvent pas être remplacées par une seule. Un couple peut bien être transformé en un autre couple; on peut même le transformer d'une infinité de manières, mais jamais on ne peut le remplacer par une force unique; et par conséquent, pour un couple, il n'y a jamais de condition d'équilibre. Si on le laisse agir, il fait tourner la ligne AA' (Fig. 16) jusqu'à ce qu'il se soit déployé dans la longueur FF' (Fig. 17). Alors il n'y a plus de couple, et l'équilibre est stable. Si l'on avait replié le couple dans la position marquée Fig. 18, il y aurait aussi équilibre, mais équilibre instable; car en le dépliant un peu, il ferait tourner la ligne et se déploierait tout-à-fait,

23. *Levier.* — On appelle *levier* une barre droite ou courbe qui peut tourner autour d'un point fixe, qu'on appelle *point d'appui* (Fig. 19 et 20).

Un levier ne peut jamais être en équilibre sous l'action d'une seule force, à moins que le prolongement de cette force ne passe par le point fixe. (Fig. 21 et 22).

Un levier étant sollicité par deux forces situées dans le même plan, il y a deux conditions pour qu'il reste en équilibre. Il faut *premièrement* que ces forces tendent à faire tourner en sens contraire, et *secondement* que leurs intensités respectives soient en raison inverse de leurs bras de levier. On appelle *bras de levier d'une force* la longueur de la perpendiculaire abaissée du point d'appui sur la direction de cette force, ou sur son prolongement; ainsi PQ (Fig. 23) est le bras de levier de la force AF , et PQ' celui de la force $A'F'$. Ces deux forces étant supposées dans le même plan, on voit qu'elles tendent à faire tourner en sens contraires et qu'elles remplissent la première condition; mais pour qu'elles remplissent aussi la seconde, il faut que la *première force contienne la seconde, autant de fois que le bras de levier de la seconde contient le bras de levier de la première*. Si, par exemple, AF est double de $A'F'$, il faudra que PQ' soit double de PQ ; si AF était mille fois $A'F'$, il faudrait que PQ' fût mille fois PQ . Cependant il ne faudrait pas croire que PQ étant d'un mètre, par exemple, et PQ' de mille, un homme qui tirerait suivant $A'F'$ pût faire équilibre à mille hommes de même force qui tireraient suivant AF ; car en passant à la pratique, il se présente des résistances dont la théorie ne tient pas compte.

24. *Pression sur le point d'appui.* — Dans l'équilibre du levier, le point fixe supporte une certaine pression qu'il est utile de connaître. Pour cela, il suffit de transporter les forces au point de rencontre de leurs directions prolongées (Fig. 24), et de chercher leur résultante par la règle du parallélogramme des forces; cette résultante passe par le point d'appui, et exprime par conséquent la grandeur et la direction de la pression qu'il supporte. Si les forces étaient parallèles (Fig. 25), on sait, par ce que nous avons dit (21), que la résultante serait parallèle aux composantes et égale à leur somme.

25. Dans l'usage ordinaire, on emploie le levier à soulever des fardeaux; alors l'une des deux forces s'appelle la *résistance*; c'est le fardeau que l'on veut soulever; l'autre s'appelle la *puissance*; c'est la force quelconque qui est mise en jeu pour soulever le fardeau. Dans ce cas, la condition d'équilibre s'exprime en ces termes : *La puissance et la résistance sont en raison inverse de leurs bras de levier*.

On distingue aussi trois sortes de leviers, suivant les positions relatives du point d'appui et des points d'application de la puissance et de la résistance. Dans le *levier du premier genre*, le point d'appui est

entre la puissance et la résistance; la balance est un levier de cette espèce; dans celui du *deuxième genre*, la résistance est entre le point d'appui et la puissance; dans celui du *troisième genre*, c'est la puissance au contraire qui tombe entre la résistance et le point d'appui.

Nous renvoyons, pour de plus amples détails, à la Mécanique de M. Poisson et à la Statique de M. Poincaré.

26. *Mouvement uniforme.* — Le mouvement uniforme est celui dans lequel le mobile parcourt des espaces égaux en temps égaux. Ainsi, concevons un mobile qui parcourt une ligne droite, et une horloge qui mesure le temps; si, dans chaque minute, le mobile avance de la même longueur, de soixante pieds par exemple, et dans chaque demi-minute de trente pieds, de vingt dans chaque tiers de minute, il se mouvra d'un mouvement uniforme. Puisque les espaces sont égaux pour des temps égaux, il en résulte que le rapport de l'espace ou temps est une quantité constante; c'est ce rapport qui s'appelle la *vitesse* du mouvement uniforme. Quand on prend un temps double ou triple, l'espace est double ou triple, et le rapport ne change pas. Le nombre qui représente la vitesse dépend des unités qu'on a choisies pour l'espace et pour le temps, et ce serait mal exprimer la vitesse que de l'exprimer par un nombre, sans désigner les unités qui ont servi à trouver ce nombre. Les mouvements uniformes sont plus lents ou plus rapides suivant que leur vitesse est plus petite ou plus grande; le vent ordinaire ne parcourt que 60 mètres en une minute, le vent des orages parcourt jusqu'à 2700 mètres; ce dernier mouvement est 45 fois plus rapide que le premier.

27. Puisque la matière est inerte, un corps qui est animé d'un mouvement uniforme doit se mouvoir perpétuellement dans la même direction et avec la même vitesse, à moins qu'une autre force ne vienne agir sur lui, soit pour changer sa direction seulement, soit pour changer à la fois sa direction et sa vitesse; car, de lui-même, un corps ne peut rien changer, ni à son état de repos ni à son état de mouvement. C'est ainsi qu'il faut entendre l'inertie, et non pas comme l'entendaient d'anciens philosophes, qui voulaient à toute force que la matière eût un penchant pour le repos. Ils comparaient les corps à des hommes paresseux : ceux-ci, disaient-ils, cherchent le repos, ils ont horreur du travail; de même, la matière a horreur du mouvement, elle se hâte d'entrer en repos dès qu'on cesse de la pousser. Ainsi, pour eux, l'inertie signifiait à peu près la même chose que paresse; mais on voit, d'après ce que nous avons dit, que trois choses essentielles constituent l'inertie : 1^o la nécessité d'une force pour donner du mouvement à la matière; 2^o la permanence du mouvement quand la force a cessé d'agir; 3^o la nécessité d'une force nouvelle pour changer le mouvement qu'elle a reçu.

Lorsque nous voyons un mouvement qui diminue, qui cesse ou qui change d'une manière quelconque, nous pouvons être assurés qu'il y a quelques causes à ces changements. Une pierre que nous lançons contre le soleil devrait aller jusqu'au soleil, si elle n'était arrêtée par la résistance de l'air et par la pesanteur qui la rappelle vers la terre. Une bille de billard, une fois mise en mouvement, roulerait d'une bande à l'autre sans jamais s'arrêter, si elle n'éprouvait aussi la résistance de l'air, et un frottement plus ou moins considérable sur les filets du tapis.

28. La plupart des forces qui mettent les corps en mouvement, n'agissent d'une manière directe que sur un petit nombre des molécules qui composent les corps. Ainsi, quand on choque une bille de billard, on ne touche que quelques points de sa surface; quand le vent pousse un voilier, il ne presse que les voiles; et quand la poudre lance un boulet, les gaz qui se développent et qui donnent l'impulsion ne touchent et ne pressent que son hémisphère intérieur. Cependant toutes les parties d'un corps se meuvent; aussi bien les parties sur lesquelles la force n'agit pas, que les parties qu'elle pousse directement. Il faut donc qu'il se fasse un partage du mouvement entre toutes les molécules, et un partage égal, afin qu'aucune ne prenne l'avance et qu'aucune ne reste en retard; celles qui sont directement choquées poussent les voisines, celles-ci les suivantes, et ainsi de proche en proche, jusqu'à ce qu'enfin toute la masse soit ébranlée et que toutes les parties se meuvent d'un commun mouvement. Pour passer d'une molécule à l'autre, et pour se répandre dans toute la masse, le mouvement exige un certain temps qui n'est pas très grand, mais qui n'est pas non plus infiniment court; la durée de cette diffusion du mouvement est analogue à la durée qui est nécessaire pour qu'un fluide se répande dans un vase et s'y mette de niveau : elle dépend de la masse et de la nature du corps; c'est pourquoi il n'y a jamais de mouvement qui soit absolument instantané. Ce principe s'étend à toute matière, même à celle qui entre dans la composition des corps organiques : dans l'animal le plus vif, le mouvement n'est pas aussi rapide que la pensée, il faut un certain temps très court pour qu'il prenne son essor et sa vitesse. Un oiseau peut voir la flèche qui vient le frapper, mais la flèche est plus rapide que les contractions musculaires, et n'eût-il qu'à tourner la tête pour éviter le coup, la tête est percée avant que le jeu des muscles ait produit son effet. Il y aurait de curieuses recherches à faire sur la rapidité de la contraction des divers organes dans les divers animaux.

29. *De la Quantité de mouvement.* — Quand une force agit sur un corps, quand le mouvement s'est répandu dans toutes les parties de la masse et que toutes se meuvent d'une vitesse commune, tout est fini pour la force; elle a produit tout son effet, et l'on peut dire qu'elle est passée dans le mobile,

qu'elle s'y est répandue, et qu'elle y reste comme si elle y était enfermée.

Ainsi, le projectile lancé par la main, par un ressort qui se débände, par un choc rapide ou par une explosion soudaine, s'en va, parcourant l'espace, pour obéir à la force qui a produit son effet, et qui, présentement, n'agit plus sur lui. Si ce projectile ne rencontrait rien, ni l'air, ni l'eau, ni aucun fluide, ni aucun corps en repos, ni aucun corps en mouvement, si, en outre, aucune autre puissance n'agissait sur lui, il s'en irait suivant la ligne de l'impulsion qu'il a premièrement reçue, et il la parcourrait d'un mouvement uniforme sans se dévier et sans s'arrêter; après un siècle, comme après une seconde, il aurait encore la même direction et la même vitesse. Cette permanence du mouvement est, comme nous l'avons vu, l'un des attributs de l'inertie; on peut l'exprimer en disant que l'action d'une force ne dure qu'un instant, et que l'effet qu'elle produit se continue éternellement.

C'est ainsi que le mobile conserve l'empreinte de la force à laquelle il a été soumis, et l'on conçoit que la force restant la même, elle produirait des effets très différents sur des mobiles différents. La charge de poudre qui lance une balle pourrait à peine soulever une bombe, et l'on sait bien que l'arc qui lance au loin une flèche légère ne pourrait pas lancer avec la même vitesse une flèche plus pesante. On entend dire assez généralement que cette différence dépend de la pesanteur; mais c'est une explication fort trompeuse, car elle semble indiquer que, si tous les corps essaient d'être pesans, ils seraient tous projetés avec la même vitesse; ce qui est une grande erreur. Supposons pour un moment que les corps dont nous venons de parler cessent d'être pesans, supposons même qu'il n'y ait plus d'air qui s'oppose à leur mouvement: il arriverait encore que la balle irait plus vite que la bombe, et que la flèche de bois serait aussi plus rapide que la flèche de fer; parce que la même force appliquée à des quantités de matière différentes imprime une vitesse d'autant moindre que la quantité de matière est plus grande. Voici sur ce point important un axiome qui est un principe essentiel de mécanique: *Quand une même force agit sur des mobiles différens, elle leur imprime des vitesses qui sont en raison inverse de leurs masses, ou de la quantité de matière qui les compose.* Ainsi la même force d'explosion qui lancerait successivement des balles de plomb dont les volumes, et par conséquent les quantités de matière seraient 1, 2, 3, 4, etc., ne leur imprimerait que des vitesses 1, $1/2$, $1/3$, $1/4$, etc., tellement que la balle dont la masse serait 10 ne recevrait qu'une vitesse $1/10$, celle dont la masse serait 100 ne recevrait qu'une vitesse cent fois plus petite, et ainsi de suite; d'où l'on voit que, pour chacune, la masse multipliée par la vitesse donne le même nombre; car, pour la première, ce produit est $1 \times 1 = 1$, pour la seconde $2 \times 1/2 = 1$, etc. C'est ce produit de la masse

d'un mobile par sa vitesse qu'on appelle *quantité de mouvement*. Il suit de là qu'une même force d'impulsion donne toujours une même quantité de mouvement, quel que soit le projectile qu'elle pousse, et qu'ainsi la quantité de mouvement caractérise une force et devient sa véritable mesure.

On dit qu'une force d'impulsion est double, triple ou quadruple d'une autre, quand elle produit une quantité de mouvement qui est double, triple ou quadruple; d'où résultent ces trois conséquences:

1^o *Que les forces sont entre elles comme les quantités de mouvement qu'elles produisent, ou bien qu'elles sont entre elles comme les produits des masses par les vitesses;*

2^o *Que pour des masses égales, les forces sont entre elles comme les vitesses qu'elles impriment;*

3^o *Que pour des vitesses égales, les forces sont entre elles comme les masses sur lesquelles elles agissent.*

30. *De la communication du mouvement.* —

Quand un corps en mouvement rencontre un corps en repos ou un autre corps en mouvement, il se produit des effets très-curieux, qui dépendent de l'élasticité, de la dureté et de la masse relative des corps. Jusqu'à présent la science n'est parvenue à faire l'analyse de ces phénomènes qu'en supposant les corps parfaitement élastiques, on en les supposant complètement dénués d'élasticité; hypothèses qui ne sont vraies ni l'une ni l'autre, mais d'où l'on déduit cependant quelques règles simples, qui sont très utiles dans la pratique. Nous ne pouvons considérer ici que les corps sans élasticité, les singuliers phénomènes des corps élastiques devant être discutés en détail dans l'un des livres suivans.

1^o Quand deux masses égales, non élastiques, et animées de la même vitesse, viennent à se choquer *directement*, elles se pressent l'une l'autre, s'arrêtent tout à coup, et restent en repos dans le lieu même où le choc a eu lieu. C'est un principe évident de lui-même, car ces masses ne peuvent rejaillir, puisqu'elles manquent d'élasticité; et l'une ne peut entraîner l'autre et la pousser devant elle, puisque tout est égal dans les deux sens opposés. Ainsi, deux balles de plomb parfaitement égales, qui seraient lancées en même temps avec la même force, arrivant l'une contre l'autre avec la même vitesse, s'aplatiraient, parce qu'elles ne sont pas dures, et resteraient sans mouvement. Si elles tombent après le choc, ce n'est pas par un reste de vitesse qui n'aurait pas été détruit, mais bien par l'effet de la pesanteur qui agit sans cesse sur elles.

2^o Ce principe s'applique aux masses inégales, sous la seule condition que leurs quantités de mouvement soient égales entre elles, c'est-à-dire que, si l'une des masses est double de l'autre, il suffit que celle-ci ait une vitesse double pour être capable d'arrêter la première: une masse qui serait cent fois plus petite devrait avoir une vitesse

centuple pour produire le même effet, et ainsi de suite. Une balle de plomb d'une once arrêterait exactement un biseaïen d'une livre, si elle avait une vitesse seize fois plus grande que celle du biseaïen, et elle arrêterait un boulet de 48, si sa vitesse était sept cent soixante-huit fois plus grande que celle de ce boulet, puisqu'une once est la sept cent soixante-huitième partie de quarante-huit livres. Deux quantités de mouvement égales et contraires se détruisent exactement quand l'élasticité n'est pas en jeu, parce qu'en effet deux quantités de mouvement égales et contraires n'étant en réalité, comme nous l'avons vu, que deux forces égales et contraires, il faut bien qu'elles se détruisent.

3° Quand les quantités de mouvement sont égales, c'est la plus grande qui l'emporte; le mobile qui en est animé repousse devant lui l'autre mobile, il le force de rebrousser chemin, et à partir de cet instant ils se meuvent ensemble avec une vitesse qui leur est commune.

Alors la quantité de mouvement qui reste n'est que la différence de deux quantités de mouvement primitives; et comme elle est appliquée à la somme des deux masses, on voit que la vitesse restante n'est autre chose que cette différence des quantités de mouvement divisée par la somme de ces masses.

Si les mobiles allaient dans le même sens, les quantités de mouvement s'ajouteraient, et la vitesse commune, qui succéderait au choc, serait alors la somme des quantités de mouvement divisée par la somme des masses.

Ces conséquences s'appliquent au cas où un mobile rencontre un corps en repos; car pour avancer il est forcé de pousser devant lui ce corps en repos, et par conséquent de lui communiquer une telle quantité de mouvement qu'après le choc ils se meuvent ensemble d'une vitesse commune. Si la masse du corps en repos est égale à celle du mobile, il est clair qu'après le choc le mouvement sera également partagé entre les deux masses, et la vitesse ne devra être que moitié, puisque la masse est devenue double; elle ne serait que le tiers de la vitesse primitive si la masse en repos était double de la masse du mobile; et l'on voit qu'en général, pour avoir le rapport de la vitesse qui a lieu après le choc à celle qui avait lieu avant le choc, il faut diviser la masse du mobile par la somme des masses du mobile et du corps en repos. Ainsi, une balle d'infanterie pesant $1/20$ de livre, et sa vitesse au sortir du canon étant de 1300 pieds par seconde, un voit que, si elle vient frapper un boulet de 48 qui soit en repos, elle le pousse devant elle; et leur vitesse commune est à la vitesse de 1300 pieds comme $1/20$ est à $48 + 1/20$, ou comme 1 est à 961, c'est-à-dire qu'elle est $1300/961$, ou à peu près de 1 pied et $1/3$ par seconde.

Quand une balle vient frapper un grand bloc de pierre ou une montagne, elle doit aussi lui im-

mer une certaine vitesse; seulement cette vitesse est très-petite: car le bloc de pierre pesant seulement cinq cents livres, la vitesse, après le choc, serait à 1300 pieds comme $1/20$ est à $500 + 1/20$, ou comme 1 : 10001, c'est-à-dire qu'elle ne serait guère de plus d'un pouce par seconde; mais la résistance et le frottement ont bientôt détruit ce mouvement, qui se communique de proche en proche à tous les corps voisins, et même à la masse entière de la terre.

Ainsi, le mouvement se communique et ne se perd jamais: quand il semble s'éteindre, c'est qu'en réalité il sort du mobile pour passer dans les corps qui se trouvent sur son chemin; il se répand de proche en proche dans tous les corps qui sont contigus à ceux-ci; et il y devient insensible par la grande diffusion qu'il y éprouve. Il faut du mouvement pour détruire le mouvement; les résistances et les frottements le dispersent et ne le détruisent jamais.

C'est d'après ces données que l'on mesure la vitesse des projectiles. On forme une espèce de pendule qu'on appelle *pendule balistique*, et qui se compose d'une grande masse de bois ou de métal suspendue par une barre de fer (Fig. 26). La suspension de ce pendule pesant est ajustée pour qu'il oscille avec aussi peu de frottement qu'il est possible. On tire contre cette masse; le projectile y pénètre à une certaine profondeur, et partage avec elle tout le mouvement qui l'anime. La masse est poussée d'une certaine quantité, d'après laquelle on juge de la vitesse qu'elle a reçue; cette vitesse, multipliée par la somme des masses, donne la quantité de mouvement qui a lieu après le choc, et par conséquent celle qui avait lieu auparavant; il suffit donc de la diviser par la masse du mobile pour avoir la vitesse que possédait ce mobile au moment où il est venu frapper le pendule.

Il se présente dans la communication du mouvement des phénomènes singuliers qui dépendent de l'état d'aggrégation des corps et de la rapidité avec laquelle le mouvement peut se transmettre de molécule en molécule dans l'intérieur d'une même masse. On sait, par exemple, qu'une balle traverse un carreau de vitre sans le rompre, et qu'elle y fait seulement un trou, comme ferait un emporte-pièce dans une feuille de métal. Cet effet ne dépend que de la vitesse de la balle, et non pas de sa forme; car si en la jette avec la main, elle casse le carreau tout aussi bien que le casserait une pierre. Mais dès qu'elle s'avance avec la rapidité que lui donne la poudre, les molécules qu'elle touche sont enlevées si vivement qu'elles n'ont pas le temps de transmettre sur les côtés le mouvement qu'elles reçoivent: tout se passe alors dans le cercle que frappe la balle; et le carreau tout entier, ne fût-il soutenu que par un fil de soie, n'éprouverait pas le moindre ébranlement.

C'est par la même raison que l'on a vu souvent un boulet de canon couper en deux le fusil d'un

fantassin sans que celui-ci ressentit la moindre pression, à peu près comme avec une baguette on coupe une tête de pavot sans faire fléchir la tige. Pareillement on croyait que la bombe pourrait emporter avec elle une corde très souple et très tenace, qui n'aurait qu'à se dérouler pour suivre le mouvement, et que de cette manière on pourrait sans danger porter un prompt secours à une grande distance, soit dans les naufrages ou les incendies, soit dans d'autres pressantes détresses; mais à l'expérience on n'a pu réaliser cet ingénieux projet; la corde casse, et ne suit point la bombe. Il faudrait un projectile dont la vitesse s'accrût assez lentement pour que l'adhésion des molécules pût résister aux secousses; car nous devons considérer la force d'adhésion, qui unit les molécules des corps, comme une sorte de lien immatériel qui ne peut supporter qu'un certain effort sans se rompre. Une molécule étant tirée, et l'autre étant en repos, le lien se brise si elle est tirée trop vivement; et, dans un temps donné, il ne peut passer ainsi d'une molécule à l'autre qu'une quantité de mouvement donnée.

Le mouvement produit par une explosion, soit par celle de la poudre, soit par celle de l'air on de la vapeur comprimés, est un mouvement qui se communique essentiellement dans tous les sens. Les parois du canon empêchent l'expansion latérale, et tout l'effet se porte dans le sens de la longueur; mais là il se produit également dans les deux directions contraires, c'est-à-dire en avant pour pousser le projectile, et en arrière pour repousser la culasse, le canon et toutes les pièces qui en dépendent. Ces deux quantités de mouvement, qui sont toujours opposées, sont aussi toujours égales; de là vient le recul, qui accompagne inévitablement le départ du projectile. Si le fusil n'est pas repoussé contre l'épaulé avec toute la vitesse de la balle, et si le canon et ses affûts ne reculent pas aussi vite que part le boulet, c'est seulement parce que les projectiles ont beaucoup moins de masse que les armes qui servent à les lancer. Quand un chasseur tire un coup de fusil, son épaulé éprouve la même pression que si une balle venant du dehors entrait dans le canon, et en frappait le fond avec toute la vitesse de la balle qui sort.

On conçoit qu'il suffit de connaître le poids de l'arme, le poids du projectile et la vitesse du recul, pour en déduire la vitesse du projectile à son départ. C'est une méthode qui a été employée avec succès par Robins. Une circonstance digne de remarque, et qui est une autre preuve de la lenteur avec laquelle le mouvement se répand dans toute l'étendue d'une masse considérable, c'est que le recul ne commence à être sensible que quand le boulet est sorti du canon. L'expérience en fut faite pour la première fois à La Rochelle vers 1667, par les ordres du cardinal de Richelieu. On avait suspendu un canon à l'extrémité d'un grand levier mo-

bile, et le boulet qui on sortait venait frapper le but, comme si le canon n'avait pu faire son recul que dans la direction même du mouvement du projectile.

La résistance des milieux n'est qu'un effet de la communication du mouvement. Quand un corps se meut dans l'eau, il est forcé d'écarter la couche qu'il rencontre, et tout le mouvement qu'il lui donne est autant de mouvement qu'il perd; puis, à mesure qu'il avance, il rencontre d'autres couches en repos, les écarte pareillement, et perd ainsi de nouvelles quantités de mouvement. Il en est de même pour tout autre milieu, tel que celui de l'air, d'un gaz ou d'un fluide quelconque. On admet dans tous ces phénomènes un principe général, savoir : que la *résistance d'un milieu est proportionnelle au carré de la vitesse du corps qui le traverse*, et voici la raison que l'on en donne : Quand la vitesse devient double, le corps parcourt une fois autant d'espace dans le même temps, et de là résulte, 1^o qu'il rencontre une fois autant de molécules auxquelles il donne du mouvement, ce qui lui fait déjà une perte double; 2^o comme il va une fois plus vite, il donne à ces molécules une fois autant de vitesse, ce qui double encore sa perte et la rend ainsi quatre fois plus grande. Donc, quand la vitesse devient 2, la perte devient 4, qui est le carré de deux. On voit de même qu'avec une vitesse triple il rencontre trois fois autant de molécules, auxquelles il donne trois fois plus de vitesse, ce qui fait une perte neuf fois plus grande; et ainsi de suite. Pour des vitesses égales dans des milieux différens, les pertes dépendent de la quantité de matière que contiennent ces milieux, sous un volume donné, et de l'adhérence ou de la viscosité plus ou moins grande qui existe entre les molécules.

31. *De la force centrifuge.* — Concevons une petite boule sans pesanteur attachée à l'extrémité d'un fil extensible *ca* (Fig. 27), et supposons qu'on lui donne une impulsion pour la faire tourner autour du point *c*, comme la pierre d'une fronde tourne autour de la main. Il est clair que la boule décrira un cercle entier, puis un autre cercle, et ainsi de suite indéfiniment; s'il n'y avait pas de résistance, ce serait un mouvement perpétuel, et perpétuellement uniforme. La vitesse de ce mouvement circulaire est égale à l'espace divisé par le temps, comme celle du mouvement rectiligne. En même temps le fil éprouve une tension, car si on le coupe à un instant donné, la boule ne se mouvra plus en cercle, comme elle faisait auparavant; mais elle ira droit devant elle, en suivant la tangente sur laquelle elle se trouve. C'est la cause de cette tension du fil qu'on appelle *force centrifuge*, parce qu'en effet c'est l'effort que fait la boule pour fuir le centre, ou, ce qui revient au même, c'est l'effort qu'il faut faire pour la retenir et l'empêcher de s'en éloigner.

Quand la pierre d'une fronde tourne lentement,

la corde est peu tendue; quand elle tourne vite, la corde se tend davantage; ainsi la force centrifuge est dépendante de la vitesse de rotation, elle croît et décroît avec elle dans un certain rapport. On démontre en mécanique que dans des cercles inégaux, qui sont décrits dans le même temps, les forces centrifuges sont proportionnelles aux rayons. Par exemple, cas (Fig. 27) étant une roue horizontale ou verticale qui tourne autour de l'axe c , la force centrifuge du point a sera double de celle du point b , si ca est double de cb .

Pour des cercles égaux, décrits dans des temps différens, les forces centrifuges sont en raison inverse des carrés des temps.

Si le mouvement n'était pas circulaire, s'il suivait une autre courbe quelconque, il n'y en aurait pas moins une force centrifuge; mais alors elle serait évaluée d'une autre manière. Dans tout mouvement curviligne la force centrifuge existe, et il faut toujours, pour l'empêcher d'avoir son effet, ou un fil qui retienne le mobile, ou une résistance qui l'empêche de s'éloigner, ou enfin une force attractive, qui agisse sans cesse sur lui et qui le presse vers le centre de rotation, autant que la force centrifuge le pousse à s'en écarter.

32. *Mouvement uniformément accéléré.* — On appelle *mouvement varié*, en général, le mouvement rectiligne ou curviligne dans lequel la vitesse change à chaque instant. Le mouvement est dit *accéléré*, si la vitesse va en augmentant, et *retardé*, si elle va en diminuant. On conçoit qu'il y a une infinité de mouvemens variés, car la vitesse d'un mobile peut changer en plus ou en moins d'une infinité de manières différentes. En général, dans les mouvemens variés de la nature, elle change suivant des lois assez simples pour qu'on puisse analyser toutes les circonstances que présente le mobile, pendant des temps très considérables.

33. Dans le mouvement varié la vitesse n'est pas le rapport de l'espace au temps, comme dans le mouvement uniforme. Concevons un mobile qui se meuve d'un mouvement accéléré ou retardé, d'une manière quelconque; puisque son mouvement n'est pas uniforme, c'est qu'à chaque instant il y a une

force nouvelle qui vient troubler l'uniformité, qui vient agir dans le sens même du mouvement pour en augmenter la vitesse, ou en sens contraire pour la diminuer. C'est là la cause nécessaire de la variation. Réciproquement, si, à une époque quelconque du mouvement varié, aucune force nouvelle ne venait agir sur le mobile, il est clair que toute variation cesserait à l'instant, et que le mobile continuerait de se mouvoir en ligne droite et d'un mouvement uniforme. Or la vitesse de ce mouvement uniforme qui succéderait ainsi au mouvement varié, si aucune force nouvelle ne survenait pour soutenir la variation, est précisément ce que l'on nomme la vitesse du mouvement varié.

Le mouvement *uniformément accéléré* est une espèce particulière de mouvement varié, c'est celui dans lequel la vitesse croît proportionnellement au temps; on peut le définir aussi en disant qu'il est le mouvement produit par une force *accélétratrice constante*, c'est-à-dire par une force qui agit toujours sur le mobile, et qui a toujours la même direction et la même grandeur; car on démontre en mécanique qu'il n'y a que les forces de cette nature qui puissent imprimer au mobile des vitesses qui deviennent doubles, triples ou quadruples, quand les temps écoulés sont doubles, triples ou quadruples.

34. Toutes les lois du mouvement uniformément accéléré sont comprises dans les deux formules suivantes :

$$v = gt$$

$$e = \frac{gt^2}{2},$$

dans lesquelles t est le temps qui s'est écoulé depuis le départ du mobile, g la vitesse qu'il a acquise après une unité de temps, v celle qu'il a acquise après le temps t , et e l'espace total qu'il a parcouru dans le même temps. De ces quatre choses, deux étant connues, on peut trouver les deux autres. Nous en verrons de très utiles applications en traitant de la pesanteur.

LIVRE PREMIER.

DE LA PESANTEUR.

CHAPITRE PREMIER.

DES EFFETS DE LA PESANTEUR ET DE SA DIRECTION.

35. Les corps tombent quand on les abandonne à eux-mêmes, et ils tombent jusqu'à ce qu'ils touchent la terre ou quelque autre corps qui les soutienne. Ce phénomène se produit à la surface du sol, comme on l'observe tous les jours; il se produit à de grandes hauteurs dans le ciel, comme on peut en juger par la grêle et la pluie qui tombent des nuages; et il se produit encore à de grandes profondeurs sous terre, comme on le voit dans les puits, dans les caves et dans les mines les plus profondes que l'on ait pu creuser : quand on voit des montagnes qui s'affaissent, c'est qu'elles manquent par leur base, qui sans doute est encore plus enfoncée que le fond des mines; elles tombent faute d'avoir un appui qui soit assez ferme pour les soutenir. Cependant la matière étant inerte, et ne pouvant d'elle-même ni prendre du mouvement, ni changer celui qu'elle a, il est clair que d'elle-même elle ne pourrait descendre vers la terre, puisque ce serait se donner du mouvement; il faut donc qu'il y ait une force qui la fasse tomber, et c'est cette force qu'on appelle pesanteur.

Ainsi la pesanteur est la force qui fait tomber les corps. Mais cette définition donnerait de la pesanteur une idée tout-à-fait incomplète, si l'on supposait qu'elle ne pût produire d'autre effet que faire tomber les corps. Il faut s'attendre à voir cette force produire encore beaucoup d'autres phénomènes et beaucoup d'autres mouvements qui sont désignés dans le langage usuel par des mots très différents. Tels sont, par exemple, les mouvements des liquides qui s'écoulent des vases, et le mouvement des fleuves qui coulent vers la mer; tels sont les mouvements du liège et des corps légers qui s'élèvent du fond de l'eau à sa surface; tels sont encore les mouvements de la fumée, des brouillards et des ballons qui s'élèvent dans les airs. Tous ces phénomènes, qui semblent si con-

tradictoires, ne sont que des effets variés de la même force, que nous venons d'appeler pesanteur.

Pour embrasser dans toute son étendue l'étude d'une force aussi féconde en résultats, nous aurons donc à rechercher tous les phénomènes différents qu'elle peut produire, et à déterminer ensuite les lois des actions qu'elle exerce, suivant les lieux qu'occupent les corps, suivant les arrangements de leurs parties, et l'espèce de matière qui les compose.

Nous voyons d'abord que la pesanteur agit sur presque tous les corps qui se présentent à nos observations, mais qu'elle agit sur eux pour les faire tomber avec des vitesses très différentes. Les pierres et les métaux tombent très vite, le bois et les autres substances végétales tombent plus lentement, et il existe des corps, comme les plumes, les duvets et les flocons de neige, qui semblent à peine pesans, car ils flottent dans les airs, et ne tombent qu'avec une grande lenteur. Il résulte déjà de ce premier aperçu que, si la pesanteur n'est pas une force universelle, c'est au moins une force très générale; car il n'y a qu'un petit nombre de corps, comme la flamme et la fumée, qui semblent se soustraire à son action. C'est là du moins ce qui arrive en nos climats, et ce dont nous sommes témoins dès les premiers jours de notre enfance; mais la terre est si grande qu'il est curieux de savoir ce qui se passe en d'autres lieux, sur les mers éloignées, sur les îles ou sur les continents qui n'ont plus ni les mêmes saisons, ni la même position par rapport à l'axe du monde. C'était aux voyageurs à nous l'apprendre, et les voyageurs nous assurent que, si d'un pays à l'autre on voit changer les hommes, l'aspect du ciel et les productions du sol, il y a toujours une chose qui, au milieu de tant de variations, n'éprouve point

de changement; c'est la force de la pesanteur : partout elle agit de la même manière, soit au milieu des mers ou des continents, soit dans les régions des pôles ou dans celles de l'équateur. Que s'il se trouve quelques légères différences, elles ne sont pas sensibles dans les phénomènes ordinaires; et il est vrai de dire que non-seulement la pesanteur agit sur presque tous les corps, mais encore qu'elle agit à peu près de la même manière dans tout le vaste contour du globe de la terre.

38. Direction de la pesanteur. — Pour déterminer la ligne suivant laquelle tombent les corps, on pourrait les suivre de l'œil et approcher une règle droite dont ils dussent raser le bord; mais il y a un meilleur moyen, qui est de fixer un fil par un bout et d'attacher à l'autre bout un petit ballon peu pesant. La direction du fil, quand il sera tendu et en repos, sera précisément la direction de la pesanteur; car si cette force agissait suivant une autre ligne, elle tirerait le fil et l'entraînerait suivant cette autre ligne. Ce petit instrument s'appelle un *fil à plomb* ou un *pendule*, et sa ligne de repos s'appelle la *verticale* (Fig. 29); ainsi la direction de la pesanteur est celle du fil à plomb ou de la verticale, et rien n'est plus facile que de la trouver à chaque instant dans tous les lieux de la terre.

Supposons qu'après avoir fait cette expérience hier, nous la recommençons aujourd'hui, nous serons fort embarrassés de savoir si le fil à plomb n'a pas changé dans l'intervallo. Il faudrait avoir quelques points fixes, où l'on pût rapporter ses directions, pour les comparer ensuite. Un édifice très solide n'a pas assez de stabilité pour cet objet; car si après un certain temps, nous trouvions que le fil à plomb n'est plus à la même ligne par rapport à ses murs ou à ses arêtes, nous serions encore très embarrassés pour une conclusion; nous serions bien que quelque chose est changé, mais nous ne serions pas si c'est dans la direction de la pesanteur ou dans la stabilité de l'édifice. Les flancs ou les arêtes d'une montagne ne seraient pas des marques moins incertaines : car, sur la terre, une montagne aussi est une chose instable; il faut moins qu'un tremblement de terre pour l'ébranler sur sa base. Ainsi tout est mobile autour de nous, et nous n'avons pas un point fixe, ni sur les continents, ni sur les montagnes, pour juger si la pesanteur est constante ou si elle change à mesure que les siècles s'écoulent.

Heureusement nous avons un autre moyen : la surface de la mer, toute mobile qu'elle est, nous offre dans sa direction générale et dans ses limites, la plus grande stabilité que nous puissions observer sur la terre : car un ébangement de niveau, même très petit, amènerait de grandes inondations et peut-être un déluge; or il arrive, non pas fortuitement, mais par une raison que nous verrons plus tard en hydrostatique, il arrive que la direction de la pesanteur est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles; donc si la pesanteur

changeait, la mer changerait, et c'est par là seulement qu'on peut juger de la fixité de sa direction.

Au lieu de dire que la pesanteur est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, on dit quelquefois qu'elle est perpendiculaire à la surface de la terre; et voici alors ce qu'on entend par la surface de la terre. Ce n'est pas, comme on le suppose bien, la surface apparente avec ses montagnes et ses vallées, mais c'est une surface idéale que l'on conçoit de la manière suivante : supposons que l'Océan atlantique, la mer du Sud et toutes les mers qui communiquent entre elles soient tranquilles pour un moment, leur immense plage formerait une portion de surface à peu près sphérique, dont le contour sera déterminé par les sinuosités des rivages. Imaginons maintenant que les diverses parties de cette surface se prolongent en conservant leur courbure et en pénétrant sous les terres, et qu'elles se rejoignent de toutes parts au-dessous des continents; elles formeront alors un globe complet parfaitement uni, n'ayant ni montagnes ni vallées. C'est cette surface, réelle en partie, et en partie idéale, qu'on appelle *surface de la terre*, *surface de niveau*, *surface horizontale*, car toutes ces expressions sont synonymes. Quand on dit que l'Observatoire de Paris est à 65 mètres au-dessus de la surface de la mer, c'est comme si l'on disait que cette surface prolongée passe sous le premier étage de l'Observatoire, à une profondeur verticale de 65 mètres. Au contraire, il y a des plaines en Hollande qui sont au-dessous de la mer, c'est-à-dire que la surface prolongée passe sur la tête des habitants.

La surface de la terre, telle que nous venons de la définir, pourrait, avec le temps, s'élever ou s'abaisser, s'éloigner ou se rapprocher du centre; mais si par quelque cause intérieure ou extérieure elle pouvait perdre sa forme, à l'instant la terre changerait son mouvement diurne, elle sortirait de l'orbite qu'elle parcourt depuis tant de siècles, et serait peut-être poussée dans quelque autre coin de l'univers. C'est ainsi que de la stabilité de la surface des eaux dépend la stabilité de la terre et du monde.

La surface d'un lac, soit dans les plaines, soit dans les montagnes, est aussi une surface de niveau, c'est-à-dire que, si de ses rivages on abaissait des perpendiculaires sur la surface que nous venons de définir, elles y détermineraient une portion de surface qui serait semblable à celle du lac, et dont tous les points en seraient à la même distance. Il en est de même pour les surfaces des eaux tranquilles, soit au fond des puits, soit dans des vases de grandes dimensions; toutes ces surfaces sont horizontales, et toutes perpendiculaires à la direction de la pesanteur.

Il résulte de ces vérités fondamentales que toutes les directions de la pesanteur concourent vers le centre de la terre; car toutes les perpendicu-

laire à une surface rigoureusement sphérique concourant à son centre. Ainsi ABPOX (Fig. 30), représentant la section de la terre qui serait faite par le méridien de Paris, et AX étant l'axe de rotation, il arrive, par les distances en latitude, que Paris se trouve en P, son horizon suivant PH, et son fil à plomb suivant PC; que Dunkerque est en D à une distance de $2^{\circ} 11' 56''$, la ligne horizontale de Dunkerque en DH', et son fil à plomb suivant DC; enfin que Barcelone est en B, à $7^{\circ} 28' 29''$ plus au midi, l'horizontale de Barcelone en BH'', et son fil à plomb en BC.

Un observateur qui serait assez loin de la terre pour voir en même temps le fil à plomb de Paris et celui de Barcelone, verrait qu'en effet ils sont inclinés l'un à l'autre de $7^{\circ} 28' 29''$, et pourrait en conclure qu'ils concourent vers le centre de la terre. Quand on fait des expériences dans une petite étendue, comme dans un appartement ou même dans une grande ville, les fils à plomb semblent tout-à-fait parallèles, parce que le centre de la terre, qui est le point où ils tendent, est à une distance, d'environ 1432 lieues de 2250 toises, ou de 1632 lieues de poste de 2000 toises; or, 100 toises, par exemple, étant à peu près la trente-millième partie de cette distance, deux fils à plomb qui sont à 100 toises, ne font en effet qu'un angle de $6''$, 3. Mais, puisqu'il en est ainsi, on ne comprend pas d'abord comment on peut mesurer l'angle des verticales de deux points; car, si ces points sont très près, l'angle est si petit qu'il échappe aux mesures; et, s'ils sont très loins, on ne peut plus voir en même temps ni les deux verticales, ni l'angle qu'elles font entre elles; toute mesure paraît donc impossible, et serait impossible en

effet, si nous n'avions pas dans le ciel des points d'observation qui servent à nous guider. Les étoiles sont comme des jalons pour les habitants de la terre : c'est en les observant que nous pouvons mesurer nos angles et tracer nos alignemens. La distance du soleil à la terre est de 35 millions de lieues, celle de la terre aux étoiles est 400 ou 500 mille fois 35 millions de lieues; ainsi, en quelque point de son orbite que soit la terre, et en quelque point de la surface de la terre que soit un observateur, les rayons visuels dirigés sur la même étoile sont des lignes toujours parallèles.

D'après cela, quand une étoile passe au méridien, et qu'on l'observe au même instant à Dunkerque et à Paris; les deux rayons DE et PE (Fig. 31) sont parallèles, mais les deux angles qu'ils font avec les verticales sont inégaux, et l'angle de Paris EPV est justement égal à l'angle de Dunkerque EDV', plus à l'angle PCD des deux verticales, qui est par conséquent la distance angulaire de Dunkerque à Paris.

Voilà donc comment se dirige la pesanteur tout autour de la terre, et voilà comment il est possible de comparer sa direction dans les différens lieux. Il y a une conséquence qui se présente naturellement : c'est qu'après avoir observé l'angle des verticales de Dunkerque et de Paris, après l'avoir trouvé de $2^{\circ} 11' 56''$, on peut mesurer en toises ou en mètres la distance de ces deux villes; et connaissant ainsi la longueur de cet arc de $2^{\circ} 11' 56''$, on peut en conclure la longueur de la circonférence de la terre tout entière et ensuite la valeur de son rayon, comme nous le verrons dans un des chapitres suivans.

CHAPITRE II.

DE LA CHUTE DES CORPS ET DES LOIS DE LA PESANTEUR.

37. En observant les mouvemens de différens corps qui tombent, la première chose qui nous frappe est la grande inégalité de leurs vitesses. Une balle de plomb tombe très vite et une feuille d'arbrre très lentement; c'est un phénomène que tout le monde connaît, mais qui ne résulte pas, comme on le dit communément, de ce que la balle est très lourde et la feuille très légère. Car une feuille d'or battu ou une feuille d'étain, quand elles sont bien étalées, tombent aussi très lentement, tandis qu'elles tombent beaucoup plus vite

si on les ronge pour en faire de petites masses arrondies. Alors c'est le même poids, et on ne peut plus dire que c'est la différence des poids qui fait la différence des vitesses. Cette expérience est suffisante pour un observateur attouff : il en conclura bientôt que c'est l'air qui emporte les feuilles et qui les retarde dans leur chute, et que si l'air agit ainsi sur de grandes surfaces, il agit sans doute, quoique avec moins de force, sur des surfaces qui lui offrent moins de prise.

Pour trouver le vrai mouvement des corps pe-

sans, il faudrait donc les faire tomber dans un lieu où il n'y eût point d'air, et par conséquent point de résistance qui pût combattre la pesanteur. Un espace où il n'y a ni air, ni liquide, ni autre matière résistante, est, comme nous l'avons vu (3), ce qu'on appelle le vide. Un tel espace n'existe pas naturellement; mais nous pouvons l'obtenir au moyen de la machine pneumatique : ainsi nous pouvons déterminer la véritable loi de la chute des corps.

On en fait l'expérience de la manière suivante : on prend un tube de verre de huit ou dix pieds de long, fermé par un bout, et muni à l'autre bout d'un robinet de forme ordinaire, capable de tenir le vide. Par l'ouverture du robinet, on fait passer dans le tube des morceaux de plomb, du papier, des plumes, ou tout autre corps sur lequel on veut faire l'expérience. On fait le vide avec beaucoup de soin, et on ferme le robinet. Alors, en tournant promptement le tube, pour le mettre dans la verticale, on voit tous ces corps qui tombent librement dans son intérieur et qui viennent tous au même instant en frapper le fond.

On peut modifier cette expérience de manière à rendre sensible le progrès du phénomène. On entrouvre un peu le robinet et on le ferme presque aussitôt; alors un peu d'air est rentré, car on en a empêché le sifflement; et en retournant le tube comme la première fois, on observe un peu de différence dans le temps de la chute, la plume et le papier sont en retard sur le plomb. Un peu plus d'air rend le retard un peu plus long, et ainsi progressivement : tant qu'à la fin, l'air étant complètement rentré, la chute se fait dans le tube comme elle se fait à l'air libre.

Ainsi, quand la pesanteur agit seule sur les corps, quand elle n'est combattue par aucune résistance qui gêne les mouvements qu'elle leur imprime, elle agit sur tous également et avec la même énergie, quel que soit leur poids, et quelle que soit la substance qui les compose. Dans le vide, une masse d'or de cent livres ne tomberait pas plus vite qu'une parcelle d'or en feuilles, ni plus vite qu'un morceau de papier; une montagne ne tomberait pas plus vite qu'une plume.

38. Après avoir montré que, dans la réalité, tous les corps tombent avec la même vitesse, il faut chercher quelle est cette vitesse comme elle règle la chute de toute espèce de matière, et, en général, quel rapport il existe entre l'espace que parcourt un corps pesant et le temps qu'il emploie à le parcourir. Ce rapport sera la loi de la pesanteur, c'est-à-dire la loi du mouvement que la pesanteur imprime à la matière.

Cette question semblerait assez facile à résoudre si l'on pouvait avoir un tube vide d'une centaine de pieds de longueur. Il suffirait de le placer verticalement, de laisser partir de son sommet un corps quelconque à un instant donné, et de marquer le point où il passe après une seconde, après deux secondes, etc. Mais on observerait bientôt ce que l'oo-

peut observer aussi dans l'air, c'est qu'au commencement de leur chute les corps tombent très lentement, puis leur vitesse augmente de plus en plus, et en peu d'instants elle est tellement accélérée qu'on ne pourrait plus noter le point où passe un corps, tant il passe rapidement. Une balle qui tombe d'un peu haut vient frapper la terre avec un mouvement très vif, et une pierre qui tombe d'un édifice élevé prend assez de vitesse pour briser ce qu'elle rencontre ou pour se briser elle-même. Une chute aussi accélérée échappe à l'observation directe, et la loi de la pesanteur semble impossible à trouver; cependant on y parvient par quelques moyens ingénieux : par le plan incliné de Galilée, et mieux encore par la machine d'Atwood.

39. *Plan incliné de Galilée.* — Ce qu'on appelle plan incliné de Galilée n'est, à vrai dire, qu'une ligne inclinée, sur laquelle on fait rouler un mobile; c'est une corde très unie, de vingt ou trente pieds de long, que l'on tend entre deux points fixes, dont l'un est plus bas que l'autre, et sur laquelle on fait rouler un petit char, on plutôt une poulie de métal convenablement disposée. La pesanteur de la poulie serait complètement détruite si la corde était horizontale; elle aurait toute sa force, si elle était verticale; et, comme la corde a un certain degré d'inclinaison, la pesanteur de la poulie est réduite dans une certaine proportion facile à trouver par le calcul et qui est exprimée par sa valeur primitive multipliée par le sinus de l'inclinaison de la corde sur l'horizon. Mais, quel que soit le rapport dans lequel on diminue une force, qu'on la réduise à la moitié, au tiers ou au quart de sa grandeur, on ne change que le mouvement absolu qu'elle imprime, sans rien changer au rapport des espaces parcourus dans des temps donnés. Ainsi, la loi que nous allons observer sur cette corde inclinée sera la vraie loi de la pesanteur. Or, si on laisse couler le char à un instant donné, qu'on note les espaces qu'il parcourt dans la première seconde, dans les deux premières secondes, etc., on trouve que ces espaces parcourus sont entre eux comme les carrés des temps employés à les parcourir. Donc le mouvement que la pesanteur imprime suit la même loi; c'est-à-dire que la pesanteur est une force accélératrice constante (34).

40. Cette vérité fondamentale, et tous les caractères des forces accélératrices constantes, se démontrent d'une manière plus claire et plus rigoureuse par la machine d'Atwood. Cet appareil est représenté (Fig. 32). Mais pour la simplicité du raisonnement nous le réduirons à ses éléments essentiels, c'est-à-dire à une poulie parfaitement mobile, sur laquelle passe un fil très fin, qui est tiré à chaque extrémité par le même poids m (Fig. 33). L'équilibre existe quand les deux poids sont au même niveau; et il existe encore, quand l'un est plus haut et l'autre plus bas, comme il est facile de le vérifier par l'expérience. Maintenant,

ajoutons d'un côté une petite masse que nous représenterons par μ : il est clair que l'équilibre est troublé, que le poids μ entraîne le poids sur lequel il repose, et qu'il le force à descendre, tandis que l'autre, il le force à monter.

Mais quel est le mouvement qui en résulte ? est-il le même que si le poids μ tombait librement, ou bien est-il modifié par les poids opposés qui se meuvent avec lui ?

Les deux masses primitives n'ayant de mouvement que celui que leur donne la masse μ , il est évident que celle-ci ne peut leur en donner qu'à ses dépens, qu'elle perd tout ce qu'elle donne, et qu'ainsi elle tombe moins vite qu'elle ne tomberait si elle était seule. De plus, il est facile de trouver de combien sa chute est ralentie.

Soit g la vitesse qui serait due à la pesanteur après une seconde de temps ; la masse μ , si elle était libre, aurait donc au bout d'une seconde cette même vitesse g , et par conséquent une quantité de mouvement $g\mu$.

Soit x la vitesse inconnue que prennent en une seconde les masses m et μ en tombant ensemble ; la quantité de mouvement du système sera $x(2m + \mu)$, puisque la masse qui se meut est d'une part m et de l'autre $m + \mu$, dont la somme fait $2m + \mu$. Or, dans une seconde, la masse μ reçoit de la pesanteur la même quantité de mouvement, soit qu'elle tombe d'une chute libre, soit qu'elle tombe d'une chute retardée par d'autres masses. Donc

$$x(2m + \mu) = g\mu, \text{ d'où } x = g \cdot \frac{\mu}{2m + \mu}.$$

C'est, dans la machine d'Atwood, la vitesse du corps qui tombe. Elle est toujours plus petite que g , et peut en être une aussi petite fraction qu'on voudra. Si l'on veut, par exemple, qu'elle en soit un centième, il suffit de poser

$$\frac{\mu}{2m + \mu} = \frac{1}{100}, \text{ d'où } 100\mu = 2m + \mu, \text{ et } \mu = \frac{m}{49,5};$$

c'est-à-dire qu'à chaque instant la vitesse, dans la machine d'Atwood, est la centième partie de la vitesse due à la chute libre, quand la masse additionnelle est la 49,5 partie d'une des masses primitives. En prenant, par exemple, $\mu = 10^g$ et $m = 495^g$, la condition sera remplie.

Il y a un grand avantage à réduire ainsi la vitesse des corps qui tombent, puisque alors les espaces parcourus peuvent être mesurés plus exactement, et la résistance de l'air complètement négligée. Cette réduction de la vitesse est le vrai principe de la machine d'Atwood. Voici maintenant sa disposition :

1° Pour éviter le frottement, on fait poser cha-

que extrémité de l'axe de la poulie sur deux autres poulies plus petites, dont les axes roulent sur des plans d'agate (Fig. 34).

2° Pour mesurer les espaces avec exactitude, on dispose près de la colonne une règle verticale et divisée, que la masse $m + \mu$ doit suivre dans sa chute, sans le toucher. Sur cette règle se meuvent deux curseurs : l'un A, en forme d'anneau, pour laisser passer la masse m et pour arrêter la masse μ , que l'on fait un peu plus longue ; l'autre C, en forme de plan, pour recevoir la masse m et l'arrêter où l'on veut.

3° Pour compter le temps pendant lequel le mobile s'est mu, on adapte auprès de la machine une horloge à secondes, et on la fait communiquer à une détente particulière qui soutient la masse $m + \mu$ vis-à-vis le sommet de la règle, où se trouve le zéro de sa division. A un instant donné, la détente part, le poids tombe, et l'horloge continue de marquer le temps qui s'écoule.

On fait les expériences de la manière suivante : On place l'anneau de la règle à une hauteur telle, qu'il arrête la masse μ après une seconde de chute depuis l'instant du départ. Pour cela, on l'élève et on l'abaisse peu à peu, jusqu'à ce que le bruit de la masse μ , au moment où elle le frappe, coïncide juste avec le batttement de l'horloge qui marque la fin de la seconde. Quand μ est arrêtée, tout le mouvement ou s'arrête pas ; car les masses m ont une vitesse acquise, en vertu de laquelle elles continuent à se mouvoir ; seulement la pesanteur n'agit plus pour changer leur mouvement ; μ étant enlevée, la force accélératrice est enlevée, et le mouvement qui succède est un mouvement uniforme. Or, d'après ce que nous avons dit (33) la vitesse de ce mouvement uniforme est précisément celle du mouvement accéléré qui avait lieu à la fin de la première seconde, et pour la trouver il suffit de placer le curseur C de telle sorte que m vienne le frapper juste une seconde après que μ est ôté, c'est-à-dire deux secondes après le départ de μ . Alors la distance des deux curseurs A et C est l'espace que m a parcouru en une seconde en vertu du mouvement uniforme ; c'est donc la vitesse de ce mouvement et aussi la vitesse du mouvement accéléré. On fait une deuxième expérience en ôtant la masse μ qu'après deux secondes ; on en fait une troisième en ne l'ôtant qu'après trois secondes, et l'on a ainsi la vitesse du mouvement accéléré après une, deux, et trois secondes. On trouve facilement que ces vitesses sont entre elles comme 1, 2, 3 ; donc elles croissent proportionnellement au temps ; donc le mouvement dont il s'agit est uniformément accéléré.

Ce résultat suffirait pour conclure que l'espace parcouru en vertu du mouvement uniformément accéléré pendant un certain temps, est moitié de l'espace parcouru dans le même temps par le mouvement uniforme qui lui succède. Mais on le voit directement ; car, dans chacune des expériences

précédentes, la distance des curseurs est double de la distance de l'anneau au point de départ.

Pareillement on pourrait en conclure par le calcul que les espaces sont comme les carrés des temps; mais il est facile d'imaginer comment on peut le démontrer aussi par le moyen de la machine.

Ces expériences s'accordent avec celle de Galilée, pour prouver que la pesanteur, qui s'exerce à la surface de la terre, est une force accélératrice constante. Déjà la chute dans le vide a fait voir qu'elle s'exerce également sur toute espèce de corps. Ainsi, toutes les molécules matérielles, quelle que soit leur forme ou leur nature, sont constamment soumises à l'action de cette force.

D'après cela, les lois du mouvement qu'elle imprime sont exprimées par les formules générales du mouvement uniformément accéléré (34),

$$v = gt$$

$$s = \frac{gt^2}{2},$$

dans lesquelles il reste à mettre pour g la valeur qui convient à la pesanteur. On se rappelle que g représente les vitesses que la force accélératrice imprime au mobile pendant l'unité de temps, et l'on se rappelle aussi que cette vitesse est double de l'espace que la force fait parcourir pendant la même unité; ainsi g est un espace ou une longueur. Nous indiquerons plus tard un moyen très exact d'en trouver la mesure, et nous verrons qu'en prenant la seconde pour unité de temps, la valeur de g est à Paris

$$g = 9^m,8088.$$

Avec cette donnée on peut s'exercer à résoudre plusieurs problèmes sur le mouvement des corps pesans.

1° Un corps tombe pendant cent secondes: quelle vitesse a-t-il à la fin de sa chute, et quel est l'espace qu'il parcourt?

2° Un corps a parcouru mille mètres dans sa chute: pendant combien de temps est-il tombé?

3° Quel est l'espace qu'un corps parcourt depuis la vingtième jusqu'à la trente-septième seconde de sa chute?

4° On donne au mobile une impulsion verticale de haut en bas, qui lui imprimerait un mouvement uniforme, dont la vitesse, exprimée en mètres, serait de a en une seconde; quel est l'espace qu'il parcourt en vertu de cette impulsion et de la force de la pesanteur?

C'est un principe de mécanique, que, quand deux forces sollicitent un mobile dans le même sens, sa vitesse est la somme des vitesses, et l'espace qu'il parcourt la somme des espaces dus à chaque force.

Ainsi, après le temps t , sa vitesse sera $v = gt + a$ et l'espace $s = \frac{gt^2}{2} + at$.

5° On donne au mobile une impulsion verticale de bas en haut, qui lui imprimerait un mouvement uniforme dont la vitesse serait de a mètres en une seconde; à quelle hauteur arrivera-t-il avant de s'arrêter, et quelle vitesse aura-t-il en revenant au point de départ?

Il résulte du principe précédent que les vitesses et les espaces se retranchent, quand les forces agissent en sens contraire. Ainsi les équations du mouvement sont ici:

$$v = a - gt$$

$$s = at - \frac{gt^2}{2}$$

gt va croissant avec le temps; ainsi la vitesse v décroît sans cesse, elle sera nulle quand on aura $a = gt$, ou quand il sera écoulé un temps égal à

$\frac{a}{g}$. Alors l'espace parcouru sera, en mettant g pour t cette valeur dans la seconde équation,

$$s = \frac{a^2}{g} - \frac{g^2}{2g^2} = \frac{a^2}{g} - \frac{a^2}{2g} = \frac{a^2}{2g}.$$

C'est la hauteur que le mobile peut atteindre. Arrivé là, il retombe de sa chute naturelle avec des vitesses toujours croissantes. Revenu enfin au point de départ, il

aura parcouru l'espace $\frac{a^2}{2g}$; ainsi il aura employé

un temps donné par l'équation $\frac{a^2}{2g} = \frac{gt^2}{2}$, c'est-à-dire

un temps $t = \frac{a}{g}$; c'est justement le temps qu'il

avait mis à monter; il aura donc à cet instant une

vitesse $v = g \cdot \frac{a}{g} = a$, ou $v = a$; c'est la vitesse qu'il avait en partant.

Ainsi, un mobile pesant, lancé verticalement, ne met pas plus de temps à monter jusqu'au point où il s'arrête qu'il n'en met à redescendre naturellement de ce point au point de départ; et la vitesse qu'il acquiert en revenant est la même qu'il avait en allant.

CHAPITRE III.

DU CENTRE DE GRAVITÉ. — DE L'ÉQUILIBRE DES SOLIDES. — DE LA BALANCE. — DU POIDS, DE LA MASSE, ET DE LA DENSITÉ DES CORPS.

41. Un corps pesant, quelque grand ou quelque petit qu'il soit, peut être considéré comme un assemblage d'un nombre infini de points matériels, dont chacun est sollicité par la pesanteur.

Toutes ces forces, quoique en nombre infini, pourraient être remplacées par une force unique, appliquée en un certain point; c'est cette force, qui ne serait autre chose que la résultante de toutes les actions de la pesanteur, que l'on appelle *le poids* d'un corps, et c'est le point où elle devrait être appliquée qu'on appelle son *centre de gravité*.

Cette définition suffit pour qu'on ne confonde pas la *pesanteur* avec le *poids*; puisque la pesanteur est la force élémentaire qui sollicite chacune des parcelles de la matière en général, et que le poids d'un corps est la somme ou plutôt la résultante de toutes les actions que la pesanteur exerce sur ce corps en particulier.

Il est très important de savoir déterminer le poids des corps et leur centre de gravité, puisque alors on pourra substituer le poids, qui est une seule force, à toutes les forces élémentaires qui agissent sur un corps, et le centre de gravité, qui est un seul point, à l'ensemble des points qui le constituent; et qu'ainsi une masse pesante, quelles que soient sa grandeur et sa forme, pourra être considérée comme un seul point sollicité par une seule force.

42. *Du Centre de Gravité.* — Dans un corps pesant, qui n'a pas quelques centaines de toises d'étendue, les actions que la pesanteur exerce sur chaque molécule peuvent être prises pour parallèles, puisqu'elles vont concourir au centre de la terre, et elles sont toutes égales, puisque ces molécules tombent également vite dans le vide; ainsi le *centre de gravité* n'est autre chose qu'un *centre de forces parallèles et égales*. De là résulte une propriété caractéristique du centre de gravité, c'est que ce point est fixe dans l'intérieur des corps solides, et ne change pas, quelle que soit la position qu'on leur donne à l'égard de la pesanteur. Par exemple, le point G (Fig. 35) étant le centre de gravité du corps ABC quand le point C est en haut, il sera encore le lieu du centre de gravité quand le point C sera en bas, ou dans toute autre position qu'on pourrait lui donner; car le point d'application de

la résultante des forces parallèles est indépendant de la direction de ces forces (21).

Pour qu'un corps pesant soit en équilibre, il n'y a qu'une seule condition essentielle à remplir; c'est que le centre de gravité soit soutenu. Par conséquent, si le centre de gravité est lui-même un point fixe, on pourra tourner le corps de toutes les manières possibles, il restera toujours en repos, parce qu'il sera toujours en équilibre. On en peut faire l'expérience avec une poulie homogène tournant autour d'un axe horizontal qui passe par le centre. Lorsqu'un corps est soutenu par un point fixe qui n'est pas le centre de gravité, l'équilibre est encore possible, mais il n'a plus lieu que dans deux positions seulement, savoir : quand le centre de gravité est dans la verticale du point fixe, soit au-dessus, soit au-dessous de ce point. On en peut faire l'expérience avec une poulie homogène tournant autour d'un axe horizontal et excentrique.

C'est de cette considération que l'on tire un moyen expérimental de trouver le centre de gravité d'un corps. On l'attache avec un fil en un point C de sa surface (Fig. 36), on le suspend, et, quand il est en repos, on marque, avec autant d'exactitude qu'il est possible, le point m où le prolongement du fil viendrait percer la surface inférieure; le centre de gravité est nécessairement sur la ligne Cm. Ensuite on recommence l'expérience en attachant le corps par un autre point A, et en marquant de même le point m' correspondant; le centre de gravité est aussi dans la ligne Am'. Donc il se trouve à la rencontre des deux lignes Cm et A'm'.

Pour des corps très lourds, on pourrait faire l'expérience en sens contraire, en les tournant sur leurs arêtes ou en les posant sur des supports de petite étendue. Mais, pour les corps homogènes qui ont des formes régulières, on détermine leur centre de gravité par des considérations géométriques assez simples.

Ligne droite. — Le centre de gravité est évidemment au milieu de la longueur.

Cylindre à bases parallèles. — Le centre de gravité est dans l'axe, puisque c'est une ligne autour de laquelle tout est symétrique; il est aussi dans la section perpendiculaire qui couperait le cylindre en deux parties égales; donc il est au milieu de l'axe

en G (Fig. 37). Il en est de même d'un cylindre creux (Fig. 38) ; et pour un cylindre en partie plein et en partie creux (Fig. 39), il n'est pas difficile de voir comment on le pourrait trouver.

Parallélogramme. — Le centre de gravité est à la rencontre des diagonales ; car chaque diagonale coupe la figure en deux parties égales. Il en est de même pour un parallélogramme creux, comme un cadre.

Cercle. — Le centre de gravité est au centre du cercle, ce point est pareillement le centre de gravité de la circonférence et celui de l'anneau compris entre deux circonférences concentriques (Fig. 40).

Triangle. — On mène les lignes de, fg, etc., parallèlement à la base (Fig. 41), ensuite la ligne Am qui coupe en deux parties égales cette base et toutes ses parallèles ; on achève les parallélogrammes dBCe, dBe', etc., par des lignes parallèles à Am. La ligne Am passe par le centre de gravité de tous les parallélogrammes extérieurs, et aussi par les centres de gravité de tous les parallélogrammes intérieurs au triangle ; et elle y passe, quelle que soit la grandeur que l'on donne à ces parallélogrammes. Or, comme ils sont, les uns circonscrits au triangle, les autres inscrits, et comme à leur limite de petitesse ils finissent par se confondre avec lui, il faut bien aussi que le centre de gravité du triangle soit sur Am ; pareillement il doit être sur Bm (Fig. 42.), donc il est en G à leur rencontre ; et il résulte des triangles semblables ABG et mGm' que mG est la moitié de AG, on que le point G est aux deux tiers de Am, à partir du point A.

Polygones. — On les décompose en triangles (Fig. 43), dont on cherche les centres de gravité ; ensuite on regarde les forces appliquées aux centres de gravité des triangles comme étant proportionnelles à leurs surfaces, on en cherche la résultante par les règles ordinaires, et son point d'application est le centre de gravité.

Pyramide triangulaire. — On mène une ligne du sommet S (Fig. 44) au point G, centre de gravité de la base AAC ; et on démontre aisément, en faisant des tranches inscrites et circonscrites, comme pour les triangles, que le centre de gravité est sur cette ligne SG ; qu'il est pareillement sur SG', et qu'ainsi il est en G'' à leur rencontre. Ensuite on conclut, par la comparaison des triangles semblables, que ce point G'' est aux trois quarts de SG, à partir du sommet. Une pyramide quelconque se décompose en pyramides triangulaires, et on arrive à cette conséquence, que, dans tous les cas, le centre de gravité d'une pyramide est sur la ligne qui joint son sommet au centre de gravité de sa base, et qu'il est aux trois quarts de cette ligne, à partir du sommet.

Polyèdre. — On le décompose en pyramides, comme le polygone se décompose en triangles.

Cône. — C'est comme une pyramide.

Sphère. — Le centre de gravité est au centre de

la sphère ; de même pour une surface sphérique ; de même pour une couche comprise entre deux sphères concentriques.

43. De l'Équilibre. — Nous avons déjà vu que la seule condition d'équilibre d'un corps pesant est que son centre de gravité soit soutenu ; mais cette condition se remplit de diverses manières, suivant que le corps est suspendu à des points fixes, ou posé sur des appuis.

Si l'aiguille AC (Fig. 45) pouvait se mouvoir librement autour de son axe sur le cadran vertical NTSN, il faudrait, pour que son centre de gravité G fût soutenu, qu'il se trouvât dans le plan vertical passant par l'axe. Il n'y peut être que de deux manières, ou en G' au-dessous de l'axe, ou en G au-dessus ; ce qui ne donne que deux positions d'équilibre. Dans le premier cas, on dit que l'équilibre est *stable*, parce qu'en écartant l'aiguille d'un côté on de l'autre de sa position, elle tend à y revenir et finit par la reprendre. Au contraire, dans le second cas, on dit que l'équilibre est *instable* ; parce que l'aiguille, pour peu qu'elle en fût écartée, ferait la bascule, et n'y reviendrait jamais. Ce résultat est général ; il y a toujours *stabilité*, quand le centre de gravité est *au-dessus* de l'axe, et *instabilité*, quand il est *au-dessous* de l'axe, et *indifférence*, quand il est *sur* l'axe. Entre ces deux positions il n'y a point d'équilibre possible, et si l'aiguille est retenue par son frottement contre l'axe, alors c'est l'axe lui-même qui est entraîné, comme il arrive dans les horloges, et qui l'est d'autant plus que le centre de gravité est plus loin de la verticale. Ainsi avec une aiguille un peu pesante, dont le centre de gravité serait loin de l'axe, une horloge devrait avancer de midi à six heures et retarder de six heures à midi.

Un corps qui est posé sur un plan horizontal et qui ne le touche que par un point, peut prendre aussi diverses positions d'équilibre ; les unes sont *stables*, et les autres *instables*, comme dans l'exemple précédent : et il y en a d'autres enfin qu'on appelle *indifférentes*, parce que le corps, quand on l'en écarte un peu, ne fait aucun effort pour y revenir, ni pour s'en écarter davantage ; il reste dans la position qu'on lui donne. Si du centre de gravité d'un corps on mène des rayons à tous les points de sa surface, la plupart de ces rayons sont obliques à cette surface, au point où ils aboutissent ; mais il y en a toujours un certain nombre qui lui sont perpendiculaires, et cela, quelle que soit la forme extérieure du corps ; en effet, il y a toujours un rayon *maximum* entre tous, ou *maximum absolu*, et un rayon *minimum absolu*, en général ; il y a même d'autres rayons qui sont maximum ou minimum entre leurs voisins, et tous ces rayons sont essentiellement des normales à la surface, puisqu'ils coïncident avec les rayons des sphères osculatrices. Or il est évident que, si le corps touche le plan horizontal par l'extrémité d'un de ces rayons normaux, le centre de gravité est dans la verticale du point de contact, et l'équilibre existe. Au contraire,

si le corps touche le plan par l'extrémité d'un rayon oblique, le centre de gravité n'est plus soutenu, puisqu'il n'est plus dans la verticale du point de contact.

Si le rayon normal du point de contact n'est ni maximum ni minimum, mais seulement égal à ses voisins, l'équilibre n'est ni stable ni instable, il est indifférent. C'est ce qui arrive à une sphère homogène posée sur un plan horizontal; elle est en équilibre dans toutes les positions, et par conséquent en équilibre indifférent. Si le rayon normal du point de contact est maximum, l'équilibre est instable; c'est le cas d'un œuf posé sur sa pointe, ou d'un ellipsoïde posé sur l'extrémité de son grand axe. Si le rayon normal du point de contact est le rayon minimum absolu, l'équilibre est stable, et a la plus grande stabilité qu'il puisse prendre; c'est le cas d'un ellipsoïde de révolution autour de son petit axe, et posé sur l'extrémité même de ce petit axe. Enfin, si le rayon normal du point de contact est seulement minimum entre ses voisins, l'équilibre ne sera stable que dans l'étendue des points pour lesquels le minimum a lieu; et si le rayon est, dans un sens, égal à ses voisins, tandis qu'il est dans les autres sens un maximum ou un minimum, l'équilibre est indifférent dans le premier sens, et instable ou stable dans les autres sens. C'est le cas d'un œuf posé par le côté, ou d'un ellipsoïde de révolution autour du petit axe ou du grand axe. On peut facilement imaginer diverses expériences qui rendent ces considérations plus familières.

Quand un corps est posé sur un plan par deux points, il faut que la verticale abaissée du centre de gravité tombe sur la ligne qui joint ces points, et dans l'intervalle qui est compris entre eux. Ainsi dans les voitures à deux roues, la verticale du centre de gravité doit tomber entre les roues et sur la ligne qui joint leur point de contact avec le sol. Si elle tombe en avant ou en arrière, la voiture est trop chargée de l'avant ou de l'arrière; et, comme ces voitures peuvent rouler sur des plans inclinés, où elles sont retenues par le frottement, il faut, pour qu'elles ne versent pas, que la verticale du centre de gravité ne tombe pas hors de la ligne du point de contact des roues; ce qui est d'autant plus difficile, que les roues sont plus élevées, et que la charge occupe un plus grand volume.

Quand un corps est posé sur une base plus ou moins étendue, l'équilibre n'a lieu que quand la verticale du centre de gravité tombe dans l'enceinte de la base. On conçoit qu'il importe peu que cette base soit ou ne soit pas continue; quand elle ne l'est pas, on achève son enceinte en menant des tangentes aux points extrêmes (Fig. 46). Plus l'enceinte a d'étendue, et plus le centre de gravité peut être déplacé, sans que le corps cesse d'être soutenu.

Tous les jeux d'équilibre dont on amuse les curieux roulent sur la dextérité avec laquelle on main-

tient la verticale du centre de gravité sur une base très étroite. Tantôt la base est fixe, et n'a d'étendue que quelques pouces de la longueur d'une corde assez mince, et alors il faut faire jouer le balancier pour ramener dans cet espace la verticale du centre de gravité; tantôt cette base est mobile, et il faut la faire mouvoir assez adroitement pour qu'elle se trouve sans cesse sous le centre de gravité, comme dans l'équilibre d'une canne ou d'une épée qu'on soutient sur la pointe du doigt; tantôt les deux difficultés se rencontrent à la fois, et c'est alors que le danseur de corde montre tout son talent. Mais les applications véritablement utiles des conditions de l'équilibre sont celles qui se présentent à chaque instant dans les arts. Ceux qui ne les observent pas soigneusement dans le dessin, par exemple, et dans la sculpture, sont exposés à faire des figures qui tombent, ou des statues qui ont besoin des broches qui les traversent pour se tenir debout.

44. Les conditions d'équilibre, telles qu'on les donne habituellement et telles que nous venons de les établir, ne sont réellement suffisantes que dans les spéculations de la théorie, car elles supposent à la matière une propriété dont elle ne jouit pas; elles supposent que tous les corps sont parfaitement rigides, c'est-à-dire qu'ils ne sont ni élastiques, ni compressibles, et que leurs molécules ont à l'égard l'une de l'autre une immobilité absolue. En effet, concevons une barre de fer d'un pouce carré de section et parfaitement homogène, qui soit posée par son milieu sur un appui quelconque (Fig. 47), son centre de gravité sera soutenu, et cependant l'équilibre n'aura pas lieu, car elle fléchira en vertu de son élasticité, et si elle est assez longue, elle pourra fléchir au point de se rompre. Il en est de même dans tous les cas que la nature nous présente; partout il faut tenir compte de l'élasticité de la matière et de sa ténacité. Ce qui est vrai du fer et des corps inorganiques l'est à plus forte raison des corps organisés, qui sont bien moins tenaces et bien plus élastiques. Un arbre est soutenu, parce que la verticale de son centre de gravité tombe dans la vaste enceinte qui est déterminée par les racines; mais cela n'empêche pas que les rameaux ne fléchissent par leur propre pesanteur, et que la tige elle-même ne puisse fléchir et se rompre par la même cause. Un éléphant est soutenu, parce que la verticale de son centre de gravité tombe dans l'enceinte des quatre colonnes qui supportent sa masse; mais il faut, en outre, que les vertèbres et les côtes soient assez fortement articulées pour porter un tel poids, et que les muscles et la peau puissent résister à la pression qu'ils en éprouvent.

On comprend pareillement que les changements de forme qui résultent, soit de l'élasticité, soit de la compressibilité, soit des mouvements volontaires qui déplacent les membres et les organes, sont autant de causes qui font varier le centre de gra-

tivité. Quand un homme lève le bras, son centre de gravité change de place; quand un oiseau allonge le cou, son centre de gravité est très sensiblement porté en avant. Ou voit (Fig. 48) les quatre positions du centre de gravité d'un oiseau dans les quatre situations principales de la marche, du repos, de la nage et du vol.

45. *De la balance.* — La balance se compose essentiellement d'un fléau A M B (Fig. 49), dont les deux parties m A et m B s'appellent les bras de la balance, et de deux pièces mobiles adaptées aux extrémités du fléau que l'on appelle les plateaux ou les bassins. Le fléau est soutenu vers son milieu sur un pied solide, et il porte une longue aiguille perpendiculaire qui tombe au zéro de sa division quand le fléau est horizontal, et qui passe à gauche ou à droite, suivant que le fléau se relève lui-même à gauche ou à droite. On met dans l'un des bassins le corps que l'on veut peser, et dans l'autre des poids marqués; en en met jusqu'à ce que le fléau soit horizontal, ou du moins jusqu'à ce que l'aiguille fasse des oscillations égales de part et d'autre de son zéro. Alors la somme des poids est prise pour le poids du corps. C'est ainsi que l'on pèse ordinairement quand on n'a besoin d'aucune exactitude, et quand on veut être à peu près sûr de se tromper; mais ce n'est pas ainsi que l'on pèse en physique et en chimie. Il faut deux choses pour arriver à quelque exactitude; il faut une grande perfection dans la balance et une grande habileté à s'en servir.

Pour qu'une balance soit bonne, il faut : 1^o que le fléau n'éprouve sur ses supports que le moindre frottement possible, et cette condition se remplit de la manière suivante : CC est un prisme d'acier qui traverse le fléau F, comme on le voit (Fig. 50), et qui est taillé, comme on le voit, par sa section perpendiculaire, qui est représentée en S. L'arête a est un tranchant un peu arrondi, et c'est ce tranchant, qu'on appelle le couteau, qui porte toute la masse du fléau, de l'aiguille, des bassins et des poids qu'ils contiennent : car il repose sur deux pièces d'agate ou d'acier PP qui sont incrustées dans le pied de la balance, de manière que leurs surfaces ne forment qu'un même plan horizontal.

2^o Il faut que la distance du point d'attache des bassins au point de suspension du fléau soit très exactement la même dans toutes les positions que prend l'appareil avant de s'arrêter à l'équilibre; car si ces distances pouvaient changer, les poids qui sont dans les bassins agiraient par des leviers variables, et produiraient des différences dont on ne pourrait plus tenir compte (Fig. 49) : ce serait comme si on suspendait le fléau tantôt par un point, tantôt par un autre, ou comme si on attachait les bassins tantôt à une moindre, tantôt à une plus grande distance du centre. On remplit cette condition en ajustant les pièces, pour que les bassins ne touchent le fléau que comme le fléau lui-même touche ses appuis, c'est-à-dire par des arêtes légè-

rement arrondies, très dures et très polies (Fig. 51) f représente l'extrémité du fléau; ce est un petit prisme d'acier dont l'arête tranchante est en haut, comme on le voit par la section a, et hh sont deux crochets dont les courbures rr sont aussi taillées en couteau, pour qu'en se posant sur l'arête ce il n'y ait qu'un point de contact de chaque côté, et que ce point reste le même dans toutes les oscillations du fléau.

3^o Il faut que le centre de gravité du fléau soit convenablement placé pour que l'équilibre soit stable, et pour que les oscillations ne soient ni trop lentes ni trop rapides. Si le centre de gravité était en G (Fig. 52) au-dessus de l'axe de suspension, l'équilibre serait instable, et la balance se serait folle. S'il était en G (Fig. 53) sur l'axe de suspension lui-même, l'équilibre serait indifférent, et la balance n'oscillerait pas. Dans une position inclinée, le fléau serait aussi bien en équilibre que dans la position horizontale. Enfin, si le centre de gravité est en G (Fig. 54) au-dessous de l'axe de suspension, l'équilibre est stable, d'après ce que nous avons vu (34). Quand le fléau penche à droite, le centre de gravité sort à gauche de la verticale du point de suspension; il tend à y revenir, et y revient en effet par une suite d'oscillations dont la rapidité est plus ou moins grande.

4^o Pour que le couteau ne fatigue pas les plans sur lesquels il repose, il y a deux fourchettes qui montent et qui descendent pour le soulever ou pour le mettre en place. Quand on ne se sert pas de la balance, on lève les fourchettes par un mouvement de manivelle (Fig. 55), et le fléau repose sur elles; quand on veut s'en servir, on abaisse doucement les fourchettes, et le couteau vient reposer sur ses plans. Ce mécanisme sert aussi dans chaque pesée pour arrêter les oscillations du fléau.

On pourrait bien demander, pour dernière condition d'exactitude, qu'il y eût une égalité parfaite entre les deux bras de la balance, c'est-à-dire entre la distance du couteau central aux deux couteaux extrêmes qui portent les bassins; mais il est très difficile que cette condition soit remplie, et le plus sûr est de supposer qu'elle ne l'est pas. Borda nous a dispensés d'exiger des artistes ce dernier degré de perfection, en imaginant une méthode ingénieuse qu'on appelle la *méthode des doubles pesées*. On met dans un des bassins le corps qu'on veut peser; dans l'autre, on met des poids non marqués, comme de la grenaille de plomb et des fragments de élinquant, pour compléter l'équilibre; alors on lève les fourchettes, on ôte le corps, ou tout à la fois, ou par parties, et à sa place on met des poids marqués jusqu'à rétablir l'équilibre exactement; la somme de ces poids est le vrai poids du corps, puisqu'ils produisent le même effet que lui pour équilibrer ce qui est dans l'autre bassin. Avec de bonnes balances, telles que celles de M. Fortin, il ne faudra plus pour peser exactement qu'une dextérité qui s'acquiert par l'habitude. Les

balances construites pour peser jusqu'à un kilogramme trébuchent à un milligramme. Un milligramme n'est qu'une parcelle de métal; mais c'est cependant un poids assez sensible; c'est plus que le poids d'une mouche. Les balances qui ne sont faites que pour aller à quelques grammes sont beaucoup plus délicates, et trébuchent aux fractions de milligrammes.

45. *Du poids, de la masse, et de la densité.* — Il importe, pour les relations civiles et commerciales, que les poids marqués dont on se sert soient partout les mêmes, ou du moins qu'ils aient partout un rapport connu et invariable avec un poids déterminé pris pour unité. Il importe pour la science que l'unité de poids ne puisse pas se perdre, et que l'on puisse dans tous les temps en vérifier l'exactitude, pour comparer les résultats d'une époque à ceux d'une autre époque, et en déduire des connaissances nécessaires sur les lois de la pesanteur et des conséquences utiles pour les recherches statistiques.

L'unité de poids, qui a été adoptée en France dans ces derniers temps, est le *gramme*, qui est le poids d'un centimètre cube d'eau distillée prise au maximum de condensation. Si la longueur du centimètre se perdait, on pourrait la retrouver, puisqu'elle est la centième partie du mètre; et si le mètre lui-même venait à se perdre, on pourrait le retrouver aussi, puisqu'il est la dix-millionième partie de l'arc du méridien de Paris, compris entre le pôle et l'équateur; il suffirait de recommencer la mesure de la terre. Enfin, si la terre elle-même venait à changer de forme ou de grandeur, alors le mètre serait changé; on ne pourrait plus en retrouver la longueur: mais en même temps tout serait changé pour nous; les jours et les nuits n'auraient plus les mêmes périodes, ni les saisons la même cours et la même durée; l'unité de poids serait elle-même altérée: et elle le serait encore si l'eau pouvait changer de composition, ou si la pesanteur pouvait changer d'action. Ainsi, tout est conditionnel dans nos principes les plus fondamentaux, et la science a fait tout ce qu'elle pouvait faire quand elle a établi ses bases sur la stabilité du monde.

On dit communément que la *masse* d'un corps est la quantité de matière qui le compose; mais cette définition serait tout-à-fait illusoire, si nous n'avions pas quelque moyen de comparer les quantités de matière et d'établir leur rapport. Nous savons bien que dans l'espace d'un pied cube nous pouvons faire entrer des quantités de fer très différentes; car le fer peut se comprimer, s'écraser, et se réduire à un moindre volume. Il en est de même de tous les corps, et surtout de l'air. Tout le monde sait que dans l'espace d'un pied cube on en peut faire entrer des quantités très différentes, suivant le degré de compression qu'on lui donne. Il est probable que tout l'air d'un appartement pourrait entrer dans un fusil à vent, si le réservoir était assez

fort pour résister à la pression. Ainsi, la quantité de matière n'est pas proportionnelle au volume.

C'est en vain que l'on chercherait quelque autre caractère extérieur pour juger de la quantité de matière qui est contenue dans un espace donné; on n'y arriverait jamais, s'il n'y avait dans la nature quelque force particulière qui remplit les conditions suivantes: 1^o qui sollicitât également tous les atomes des corps, et 2^o qui fût telle que l'on pût obtenir la résultante de ses actions. Or la pesanteur est une force de cette espèce; elle agit également sur toutes les substances, puisque toutes, dans leur chute, prennent la même vitesse, et on peut connaître la résultante de ses actions sur un corps donné, puisque cette résultante est le poids du corps. C'est d'après cette vérité d'expérience qu'il est permis de conclure que la *masse* ou la *quantité de matière est proportionnelle au poids*. Sur quoi il faut remarquer qu'il y a deux manières d'évaluer le poids d'un corps. On peut l'évaluer au moyen de la balance, comme nous venons de l'indiquer; alors le poids est indépendant de l'intensité de la pesanteur. Par exemple, si une balance est en équilibre à Paris, ayant une certaine quantité de fer dans un de ses plateaux et dans l'autre des poids de cuivre, de la valeur d'un kilogramme, elle serait encore en équilibre au sommet des Alpes, quoique au sommet des Alpes la pesanteur fût moindre qu'à Paris. Cela est ainsi, parce que le fer, le cuivre et toutes les substances gagnent du poids ou en perdent dans le même rapport, quand la pesanteur augmente ou quand elle diminue; la même balance serait encore en équilibre si on la portait aux limites de l'atmosphère, ou à la surface de la lune, ou même jusqu'à la surface du soleil. Au contraire, si l'on voulait évaluer les poids au moyen d'un ressort gradué qui fléchit d'une certaine quantité, le volume de fer, qui à Paris marquait un kilogramme, ferait bien moins fléchir le ressort au sommet des Alpes, et le ferait fléchir vingt-six ou vingt-sept fois davantage à la surface du soleil; son poids évalué de cette manière changerait donc avec la pesanteur, et cependant sa masse ne changerait pas. Le poids donné par la balance peut être appelé *poids relatif*; celui qui est donné par le ressort peut être appelé *poids absolu*: alors il est vrai de dire que la *masse d'un corps est proportionnelle à son poids relatif*, ou bien qu'elle est proportionnelle à son poids absolu divisé par l'intensité de la pesanteur.

Il se pourrait qu'il y eût dans la nature des substances *impondérables*, sur lesquelles la pesanteur n'exercât aucune espèce d'action; ces substances sans pesanteur seraient aussi sans poids, mais elles ne seraient pas sans masse. Seulement toute comparaison serait impossible entre elles et les masses pesantes, tant qu'on n'aurait pas découvert quelque force, ou instantanée ou constante, qui pût agir sur les substances des deux espèces. Une substance impondérable qui serait agitée à la

matière pesante pour constituer les corps, deviendrait une cause capable de retarder les mouvements dans la pesanteur; elle agirait comme les masses m qui se font équilibre dans la machine d'Atwood, car elle partagerait le mouvement imprimé par la gravité. De ce qu'on n'observe aucun retard de cette espèce, on n'en peut pas conclure qu'il n'y a pas dans les corps de substances impondérables, mais seulement que, s'il y en a, elles y sont en masse très petite à l'égard de la masse pondérable, ou qu'elles n'y sont pas agrégées d'une manière permanente, mais que les corps pesants la quittent quand ils se déplacent.

La densité d'un corps est égale au rapport de son poids à son volume (1); ce rapport est très essentiel à considérer; il est pour chaque substance une propriété caractéristique. Un centimètre cube d'eau distillée de Paris pèse un gramme, c'est là notre définition, et s'il arrive que le même volume d'eau pèse le même poids dans tous les pays du monde, on ne s'en étonne pas beaucoup. Mais un centimètre cube de fer pèse 7,8, soit qu'on l'ait tiré des mines de Snède, de France ou d'Amé-

rique, et quelles que soient les combinaisons desquelles on l'ait dégagé pour l'avoir pur. Parcilleusement un centimètre cube d'or pur pèse 19,258, soit qu'on l'ait tiré des mines du Pérou ou de celles du Japon. Le poids, sous un volume donné, c'est-à-dire la densité, est donc une propriété très fixe dans chaque substance; bien entendu qu'il faut prendre le volume à la même température; car nous avons vu que la chaleur dilate tous les corps. Nous apprendrons plus tard à déterminer les densités; pour le moment, nous les supposons connues et nous apprendrons seulement à nous en servir. De la définition que nous en avons donnée, il résulte :

1° Qu'à volume égal les densités des corps sont proportionnelles à leurs poids;

2° Qu'à poids égal les densités sont en raison inverse des volumes;

3° Qu'en général les densités sont comme le rapport direct des poids, multiplié par le rapport inverse des volumes;

4° Que le poids d'un corps est égal à son volume multiplié par sa densité;

5° Que le volume d'un corps est égal à son poids divisé par sa densité.

Il importe d'avoir compris ces sortes de formules et d'en avoir fait plusieurs applications, pour les avoir bien présentes à l'esprit.

(1) La densité s'appelle aussi *pesanteur spécifique* : pour que cette expression soit juste, il faut entendre que *pesanteur spécifique*, ou *pesanteur sous un volume donné*, signifie *poids sous un volume donné*.

CHAPITRE IV.

DU PENDULE.

46. Le pendule ordinaire se compose d'une boule pesante suspendue à l'extrémité d'un fil flexible (Fig. 60). Ses propriétés les plus fondamentales sont, 1° de marquer la direction verticale ou celle de la pesanteur, comme nous l'avons vu dans le chapitre Ier; 2° de faire des oscillations planes quand on l'écarte de la verticale, et qu'on l'abandonne à lui-même sans lui donner aucune impulsion. En effet, si on met le pendule dans une position quelconque FA, et qu'on le laisse tomber librement, il descend jusqu'en L, dépasse ce point, remonte de l'autre côté jusqu'en A', en décrivant un arc LA' égal à l'arc LA, ensuite il tombe de nouveau, arrive en L, remonte en A, et continue ainsi son mouvement pendant très long-temps. On peut remarquer que, quand le pendule descend, la vitesse va en augmentant jusqu'en L, et qu'au contraire quand il remonte, elle va en décroissant depuis le point L jusqu'au point où il s'arrête.

L'angle AFL s'appelle *l'angle d'écart*, ou simplement *l'écart*.

Le mouvement de A en A' ou de A' en A est ce qu'on appelle une *oscillation*, de A en L une *demi-oscillation descendante*, et de L en A' une *demi-oscillation ascendante*.

L'*amplitude* de l'oscillation est l'arc AA' mesuré en degrés, minutes et secondes.

La *durée* d'une oscillation est le temps que le pendule met à parcourir cet arc.

La première conséquence qui se présente après ces observations, c'est que le mouvement du pendule est le mouvement perpétuel, car, si en partant de A, il remonte à une hauteur A' qui soit la même, il faut aussi qu'en partant de A' il revienne exactement en A; et, ce qu'il a fait la première fois, il le fera la seconde, la troisième et ainsi de suite perpétuellement.

Cette conclusion serait de toute rigueur, si en

effort la hauteur du point A', où il arrive, était exactement égale à la hauteur du point A, d'où il est parti; mais les frottements du point de suspension F, et la résistance de l'air que la boule doit pousser devant elle, empêchent que cette égalité ne soit absolue. La différence ne devient sensible qu'après un certain nombre d'oscillations; et loin de s'étonner que le mouvement ne soit pas perpétuel, on s'étonne qu'il puisse se continuer pendant si long-temps: car un pendule peut, sans s'arrêter, faire des oscillations pendant des heures entières.

Le pendule est un des instrumens les plus simples de la physique, et cependant il est un des plus curieux à étudier, parce qu'il sert à la mesure exacte du temps; à la détermination de la figure de la terre, et à l'une des questions les plus importantes sur la gravitation générale de la matière.

47. *Lois des oscillations du pendule.* — 1^o La durée des oscillations qui sont très petites est indépendante de leur amplitude. On dit qu'elles sont *isochrones*, pour exprimer qu'elles se font toutes dans le même temps. Les oscillations de 4 ou 5 degrés d'amplitude ne sont plus des oscillations très petites, elles commencent à avoir une durée sensiblement plus grande.

2^o La durée des oscillations est tout-à-fait indépendante du poids de la boule et de la nature du sa substance.

3^o Les durées des oscillations sont entre elles comme les racines carrées des longueurs des pendules.

Ces lois se déduisent rigoureusement des principes du mécanisme, mais en physique on les démontre approximativement par l'expérience.

48. La première loi exigeait trop de temps pour qu'on essayât de la démontrer dans un cours: puisqu'il faudrait compter plusieurs centaines d'oscillations; les unes au commencement, quand l'amplitude est de 4 ou 5 degrés; les autres un peu plus tard, quand elle est réduite à 2 ou 3 degrés; et les dernières vers la fin du mouvement, quand elles ne sont plus sensibles à l'œil, et qu'il faut les observer avec une lunette. On s'étonne d'abord que le pendule mette presque autant de temps à parcourir un arc de $1/10$ de degré qu'à parcourir un arc de 10 degrés, qui est par conséquent cent fois plus grand; mais on en conçoit la raison en observant que, dans le deuxième cas, la pesanteur lui imprime beaucoup plus de vitesse, parce qu'elle agit plus obliquement et d'une manière plus efficace. Cette loi de l'*isochronisme* est une des premières découvertes de Galilée: on rapporte que, étant très jeune encore, il vit par hasard, dans l'église métropolitaine de Pise, les balancemens d'une lampe suspendue à la voûte, et qu'il resta très frappé des retours périodiques de ces mouvemens et de l'égalité de leur durée. Il n'en fallut pas davantage pour éveiller son génie, et cette observation d'un enfant devint la source des plus grandes découvertes.

49. La seconde loi se démontre facilement.

On prend différentes boules, de métal, d'ivoire, ou d'autres substances; on en compose des pendules de même longueur, que l'on fait osciller ensemble, et l'on voit que tous ces pendules restent d'accord pendant très long-temps.

Quand la pesanteur agit pour faire osciller un pendule, elle agit séparément sur chacun des atomes de matière qui composent la boule; ainsi un seul atome de fer, par exemple, suspendu à l'extrémité du fil, doit osciller avec la même vitesse que deux atomes pris ensemble, puisqu'ils ont leur force séparée, et que cette force a pour chacun d'eux la même intensité; il doit osciller comme le ferait une réunion quelconque d'atomes; et ou effot, sans les résistances et les frottemens, il oscillerait comme une grande boule de fer. De plus, la pesanteur agissant de la même manière sur toutes les substances, un atome de fer doit osciller comme un atome d'ivoire, d'or, ou de platine, et par conséquent toutes les masses, quelle que soit leur nature, doivent osciller avec la même vitesse. Cette expérience est importante, puisqu'elle donne une autre preuve que la pesanteur agit de la même manière sur tous les corps. L'expérience que nous en avons déjà faite dans le tube vide d'air n'est qu'une expérience grossière, puisque la pesanteur n'agit que pendant quelques fractions de secondes, tandis qu'avec le pendule nous pouvons observer ses effets sur les différens corps pendant des heures entières. Il se voit, il est vrai, que dans l'arc d'oscillation, qui se replie sur lui-même un grand nombre de fois; mais il est évident que, pour la conséquence qui nous occupe, c'est comme s'ils tombaient d'un mouvement rectiligne et progressif. C'est par des observations de cette espèce, mais qui exigeraient beaucoup de soins et de précision, que l'on pourrait découvrir s'il existe en effet, dans l'intérieur des corps, quelque substance impénétrable, agrégée d'une manière permanente à la matière pondérable, et ayant, par rapport à elle, une masse sensible à volume égal. On ne peut rien déduire des observations de Mairan sur ce sujet, elles n'ont point été faites dans cette vue, et elles datent d'une époque où l'on aurait vainement cherché le degré de précision auquel on peut atteindre aujourd'hui.

50. La troisième loi se démontre avec des pendules de diverses longueurs: si, par exemple, on prend trois pendules, dont les longueurs soient entre elles comme les nombres 1, 4, 9, alors les durées des oscillations doivent être comme les nombres simples, 1, 2, 3; et, en effet, si on fait osciller de tels pendules, soit en les suspendant au-devant l'un de l'autre, soit en les ajustant par un double fil (Fig. 59), on compte facilement que celui dont la longueur est 1, comparé à celui dont la longueur est 4, fait deux oscillations pour une, et qu'il en fait trois pour une, quand on le compare à celui dont la longueur est 9. Ce n'est que par des

considérations mécaniques que l'on peut se rendre un compte exact de ce résultat important.

61. *De l'intensité de la pesanteur, du pendule simple, du pendule absolu, et du pendule invariable.* — Les lois dont nous venons de parler sont tout-à-fait indépendantes de l'intensité de la pesanteur. Supposons que cette force devienne cent fois plus intense ou cent fois plus faible, les petites oscillations seraient encore isochrones entre elles, et leur durée conserverait encore le même rapport avec le poids des pendules et avec leurs longueurs. Mais, bien que ces lois ne changent pas avec l'intensité de la force, il y a cependant quelque chose qui change, c'est la durée absolue de chaque oscillation. Si la pesanteur cessait d'agir à un instant donné, les corps cesseraient de tomber, et les pendules cesseraient d'osciller; on, du moins, les corps ne tomberaient plus qu'en vertu de leur vitesse acquise, et les pendules qui sont actuellement en mouvement décriraient des cercles entiers, sans être rappelés dans la verticale et sans être arrêtés par autre chose que par le frottement. Au contraire, si la pesanteur venait à doubler d'intensité, les corps tomberaient plus vite, et les pendules seraient plus prompts dans les retours de leurs battements.

Mais le vrai rapport qui existe entre la durée des oscillations, la longueur du pendule et l'intensité de la pesanteur ne peut être trouvé que par les lois de la mécanique, et il ne peut être exprimé que par une formule qu'il est très important de connaître.

Soit l la longueur d'un pendule quelconque, exprimée en mètres.

Soit T la durée d'une oscillation de ce pendule, exprimée en secondes sexagésimales.

Soit π le rapport approché de la circonférence au diamètre, dont la valeur est, comme on sait, $\pi = 3,1415926$.

Enfin soit g l'intensité de la pesanteur, c'est-à-dire le nombre de mètres qui exprime la vitesse d'un corps, après une seconde de chute libre.

On aura pour la formule du pendule

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \text{ d'où } g = \frac{\pi^2 l}{T^2};$$

c'est-à-dire que l'intensité absolue de la pesanteur est égale au carré du rapport approché de la circonférence au diamètre, multiplié par la longueur du pendule qu'on observe, et divisé par le carré du temps d'une oscillation.

Pour avoir l'intensité de la pesanteur, il suffit donc de faire osciller un pendule, d'en mesurer la longueur pour avoir l , d'observer la durée d'une oscillation pour avoir T , et de faire ensuite les calculs indiqués.

Cette formule est celle qui convient au pendule simple; on appelle ainsi un pendule idéal, qu'il

est facile de concevoir, mais qu'il est impossible de construire. Il se composerait d'un fil inextensible et sans pesanteur, à l'extrémité duquel serait fixée une seule molécule de matière pesante.

62. Tout pendule qui n'est pas simple, comme le précédent, s'appelle *pendule composé*; ainsi un fil inflexible et sans pesanteur, auquel seraient attachées seulement deux molécules pesantes, l et l' (Fig. 57), formerait un pendule composé. Dans cet appareil, la vitesse d'oscillation se compose en effet des vitesses d'oscillation que prendrait séparément chacune des petites masses, en oscillant librement. La molécule l , qui n'est qu'à la distance Fl du point de suspension, tend à osciller plus vite que la molécule l' , qui en est à la distance Fl' , mais, puisqu'elles sont liées l'une à l'autre, forcées de marcher ensemble et d'accomplir leur oscillation dans le même temps, la première est retardée par la seconde, et la seconde accélérée par la première: de là, une vitesse intermédiaire, qui est la vitesse du pendule composé. Dans tout corps qui oscille, il se fait une compensation analogue, entre toutes les vitesses différentes que prendraient les diverses molécules, si chacune d'elles oscillait librement. Pour faire mieux entendre cette vérité fondamentale, nous prendrons encore un exemple: Fp (Fig. 68) représente un pendule ordinaire, tel à peu près que ceux qui servent de régulateurs aux horloges; F est le point fixe, Ft est ce qu'on appelle la tige, et H la lentille. Le point m , et ceux qui sont comme lui très voisins de l'axe de suspension, marcheraient très vite, s'ils étaient seuls. Au contraire, le point extrême p , et ceux qui sont comme lui très bas, ne pourraient marcher que très lentement. Les premiers sont donc retardés par l'effort qu'ils font pour entraîner les derniers, et ceux-ci sont accélérés par l'impulsion qu'ils en reçoivent. Donc, entre le point m et le point p il y a un certain point C , qui n'est, lui, ni retardé ni accéléré, et qui fait son oscillation exactement comme s'il était seul, et librement suspendu à l'extrémité du fil FC ; ce point remarquable est appelé le *centre d'oscillation*. Dans tout pendule composé il se trouve nécessairement un ou plusieurs centres d'oscillation, et leur distance commune au point de suspension est ce que l'on nomme la *longueur du pendule*. Cette longueur est en effet égale à celle du pendule simple, qui oscillerait avec la même vitesse que le pendule composé. Le centre d'oscillation dépend de la forme du corps qui oscille, quand ce corps est homogène; et il dépend de sa forme et de la densité de ses parties, quand il est hétérogène. Un pendule tout en cuivre aurait, par exemple, son centre d'oscillation en C (Fig. 38), quand sa tige serait très épaisse, et en C' , si elle se réduisait à un fil. Un petit poids que l'on ajouterait vers l'extrémité inférieure p , ferait descendre encore le centre d'oscillation, et il le ferait remonter, si on l'ajoutait vers le haut. Aussi voit-on, dans quelques horloges, un *curveur*

pesant, qui peut glisser le long de la tige du pendule, et que l'on fait descendre ou monter pour faire retarder ou avancer l'horloge; mais le plus souvent cet effet se produit par la lentille elle-même, qui peut être relevée ou abaissée par un petit mouvement de vis.

Puisque nous ne pouvons employer que des pendules composées, on voit, d'après ce qui précède, que, pour déterminer l'intensité de la pesanteur par les observations du pendule, il se présente deux grandes difficultés : Premièrement, celle d'observer avec précision la durée d'une oscillation; secondement, celle de déterminer avec exactitude la longueur du pendule que l'on fait osciller : car ce n'est qu'après avoir trouvé ces deux éléments essentiels, que le pendule composé peut être *raisonné* au cas du pendule simple, et qu'il est permis

d'employer la formule $T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, pour en tirer la valeur g de l'intensité de la pesanteur.

Borda est le premier physicien qui nous ait donné une méthode exacte pour mesurer le pendule : il avait le génie des recherches de cette espèce, car il avait le génie de la précision. Ses expériences furent faites, en 1790, à l'Observatoire de Paris, et l'on peut dire qu'avant cette époque il n'y avait pas un lieu de la terre où la force de la pesanteur fût connue. MM. Biot, Bouvard et Mathien ont répété les mêmes expériences en 1808, d'après les procédés de Borda et avec des instrumens analogues. En 1818, M. Arago et M. de Humboldt en ont fait encore une vérification par d'autres procédés. Toutes ces expériences confirment l'exactitude de celles de Borda, et il en résulte enfin que l'intensité de la pesanteur est, à Paris, telle qu'il l'avait trouvée, savoir de $9^m,8088$. C'est-à-dire qu'un corps qui tombe dans le vide pendant une seconde, acquiert une telle vitesse que, si la pesanteur cessait d'agir sur lui, il parcourrait $9^m,8088$ dans toutes les secondes suivantes. Ce qui peut s'exprimer encore en disant qu'un corps qui se meut dans le vide, en partant du repos, parcourt en 1^r un espace qui est de $4^m,9044$; car nous avons vu que la vitesse qui a lieu après l'unité de temps est double de l'espace parcouru pendant cette unité.

53. Il faut avoir une grande habitude des expériences, et même des expériences de cette nature, pour comprendre les soins minutieux, les corrections délicates qu'elles exigent, et toute l'habileté qu'elles supposent dans l'observateur; mais il est si important d'avoir une idée générale des méthodes d'observation que nous devons indiquer ici ce qu'il y a de plus essentiel dans la méthode de Borda. Son pendule s'appelle *pendule absolue*; il se compose d'une boule pesante, suspendue par un fil très-fin (Fig. 65). La boule étant homogène et parfaitement sphérique, et le fil étant lui-même homogène, quoique d'une autre substance, on peut calculer exactement le lien du centre d'oscillation. Ayant

trouvé, par exemple, qu'il est en e , on voit qu'il suffit alors de mesurer la longueur totale, depuis le point de suspension jusqu'au point t , et d'en retrancher et pour avoir la vraie longueur du pendule.

La boule est en platine; on choisit ce métal, parce qu'il est le plus inaltérable, et aussi parce qu'il est le plus dense, et par conséquent le moins sensible à la résistance de l'air. Sur la boule, s'ajuste une calotte exactement du même rayon qu'elle; et l'adhérence qui s'établit entre leurs surfaces, au moyen d'une légère couche de graisse, suffit seule pour soutenir tout le poids de la boule. Le fil de suspension est un fil de cuivre, qui, d'une part, traverse en son milieu l'extrémité de la queue de la calotte, et vient se fixer entre les deux pièces dont cette queue se compose, et qui va, de l'autre part, s'attacher de la même manière par son extrémité supérieure. Cette seconde pièce, qui pince l'extrémité supérieure du fil, vient s'adapter à l'appareil de suspension que l'on voit dans la figure 65. Il se compose, 1^o d'un prisme d'acier, que l'on appelle le *couteau du pendule*, parce qu'en effet il a un tranchant assez vif, par lequel il repose sur des plans d'agate, et 2^o d'un cylindre d'acier qui traverse le couteau perpendiculairement et qui vient recevoir la pièce qui porte le fil.

La figure 66 représente la disposition générale de l'appareil.

Pour déterminer la durée d'une oscillation, on met le pendule en mouvement à une heure fixe, marquée sur une bonne pendule ou sur un bon chronomètre; puis on le laisse osciller pendant plusieurs heures, et on observe l'instant précis où il achève sa dernière oscillation. Le temps qui s'est écoulé entre le commencement de la première oscillation et la fin de la dernière est le temps pendant lequel le pendule a marché : soit $4^h 10'$ ou $15000''$. Si l'on savait maintenant combien il y a d'oscillations, si l'on savait, par exemple, qu'il en a fait 20000, on dirait : En $15000''$ il a fait 20000 oscillations, d'égale durée; donc pour une seule oscillation il a employé $3/4$; et si l'on ne s'est pas trompé d'une oscillation sur ces 20000, il en résulte qu'on ne se sera pas trompé de $3'/30000$ ou de $1/20000$ de seconde, sur la durée de chaque oscillation.

Mais comment trouver ce nombre exact d'oscillations? L'on conçoit bien que l'observateur ne peut pas les compter une à une; il y aurait trop d'ennui, et surtout de chances d'erreur; aussi, l'on y parvient plus ingénieusement. On a même pour cela deux moyens qui sont également sûrs; le premier est d'avoir un compteur, que l'on règle sur le pendule par des essais préalables : une fois qu'ils sont d'accord, il ne reste à l'observateur qu'à veiller les dérangemens qui peuvent survenir par le décroissement d'amplitude dans les oscillations du pendule et à presser le compteur avec la main, ou autrement, pour le remettre d'accord. On lit sur le cadran du compteur le nombre des oscillations qu'il a faites, et c'est aussi le nombre exact des

oscillations du pendule. L'autre moyen est ce que l'on appelle la *méthode des coïncidences*; c'est celui qui a été employé par Borda. Il consiste à placer le pendule au-devant d'une horloge, comme on le voit dans la *figure 66*, et à lui donner une telle longueur que ses oscillations soient un peu plus lentes ou un peu plus rapides que celles de l'horloge. On les fait partir ensemble, et on les observe avec un grand soin; dès les premières oscillations, on les voit qui se séparent. Le pendule, par exemple, sera en retard sur l'horloge, et ils se sépareront de plus en plus jusqu'à ce qu'enfin l'horloge ayant gagné d'avance une oscillation juste, ils se retrouvent ensemble comme au départ : c'est là ce qu'on appelle une *coïncidence*. Il suffit donc que l'observateur tienne un compte exact de toutes les coïncidences qui ont lieu pendant les cinq ou six heures que dure une expérience, et alors, par le temps qui s'est écoulé, il connaît le nombre total des oscillations de l'horloge; par le nombre des coïncidences, il connaît l'avance qu'elle a prise. D'où il conclut enfin le nombre des oscillations du pendule, et par suite la durée de chaque oscillation.

Pour mesurer ensuite la longueur du pendule, on se sert d'un plan d'acier poli, qu'on ajuste très exactement au-dessous de la boule et très solidement (*Fig. 66*). On le soulève peu à peu par le mouvement d'une vis, sans qu'il cesse d'être horizontal; enfin, quand il arrive à toucher la boule, de manière qu'elle le rose légèrement en faisant ses oscillations, on est bien assuré que la distance de ce plan aux plans fixes qui portent le couteau, est précisément la distance qui se trouve entre le tranchant du couteau et le point le plus bas de la boule; alors on enlève le pendule, et à sa place on ajuste une règle divisée, qui repose sur les plans fixes par un couteau tout-à-fait semblable au couteau du pendule (*Fig. 69*). Cette règle est représentée de face dans la *figure 68*, et de profil dans la *figure 67*. On voit une languette *L*, qui sort ou qui rentre par le mouvement de la vis *x*. Quand la règle a pris la place du pendule, on fait sortir la languette peu à peu jusqu'à ce qu'elle vienne effleurer le plan d'acier, comme faisait le point *t* de la boule. Des divisions tracées sur la languette et sur la règle font connaître la longueur absolue, qui se trouve alors depuis le tranchant du couteau jusqu'à l'extrémité de la languette; on se sert aussi pour cet objet du *comparateur* représenté *figure 70*. Connaissant cette distance, on en retranche la distance du centre d'oscillation au point le plus bas de la boule, et l'on a enfin la longueur du pendule. Cette longueur *l*, et la durée τ de l'oscillation correspon-

dante étant substituées dans la formule $\tau = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

on en déduit enfin la valeur de *g*. Avec ces données, il est très facile de calculer la longueur du pendule à secondes, c'est-à-dire du pendule qui ferait juste une oscillation par seconde; et il est clair que l'in-

tensité de la pesanteur est aussi bien définie par la longueur du pendule à secondes que la valeur de *g*, puisqu'on moyen de la formule, l'un de ces éléments peut se déduire de l'autre.

On emploie le pendule décimal ou le pendule sexagésimal. Ces dénominations sont relatives au temps, car un jour solaire moyen se divise tantôt en parties décimales, tantôt en parties sexagésimales. Dans le premier cas, le jour se compose de 10 heures, chaque heure de 100' et chaque minute de 100'', ce qui fait 100000'' décimales en un jour; dans le second cas, le jour se divise en 24 heures, chaque heure en 60' et chaque minute en 60'', ce qui fait 86400'' sexagésimales en un jour. Le pendule décimal est celui qui fait une oscillation en 1'' décimal, et le pendule sexagésimal celui qui fait une oscillation en 1'' sexagésimal.

A Paris la longueur du pendule sexagésimal est de 993^{mm}, 8267 d'après les mesures de Borda. Les mesures qui en ont été prises depuis ne surpassent celle-ci que de 18 millièmes de millimètre.

A Londres, la longueur du pendule sexagésimal est de 994^{mm}, 1147. Elle a été déterminée en 1818, par le capitaine Kater, au moyen d'un appareil de son invention, qui est très ingénieux et qui est susceptible d'une grande exactitude (*Fig. 62, 63 et 64*). C'est un pendule à forte tige et à lentille, portant deux couteaux fixes, tellement disposés, que le tranchant de l'un passe par les centres d'oscillation de l'autre. Ainsi, après avoir fait osciller le pendule sur l'un des couteaux, on le retourne de haut en bas pour le faire osciller sur l'autre, et l'on retrouve exactement la même durée d'oscillation. C'est donc ici la distance des deux tranchants qui est la vraie longueur du pendule, et on peut la mesurer avec une grande précision.

54. Pour déterminer l'intensité de la pesanteur en divers lieux de la terre, il faudrait faire, dans chacun de ces lieux, ce qui a été fait à Paris ou à Londres. Mais on peut y parvenir encore par un autre moyen, qui offre de grands avantages lorsqu'il s'agit de parcourir les mers et d'aborder sur des côtes désertes, où il est impossible de s'établir d'une manière permanente, comme dans un observatoire. Ce moyen consiste à employer le pendule que l'on appelle *pendule invariable*. Il se compose d'une forte tige de cuivre ou de bois, qui est traversée dans sa partie supérieure par un couteau semblable à celui du pendule, et qui porte à sa partie inférieure une lentille pesante, amincie sur les bords, pour mieux fendre l'air dans ses oscillations. Un trépied solide est destiné à porter le plan d'agate sur lequel on pose le couteau du pendule. lorsqu'on veut le mettre en expérience. Ce trépied lui-même doit reposer sur un sol inébranlable, et, pour cela, le voyageur emporte avec lui des masses de pierre de taille, qu'il se contente d'établir à quelques pieds de profondeur quand il est en terre ferme, et qu'il établit sur pilotis quand il est en terre sablonneuse. C'est sur cette base solide que

l'on fait osciller le pendule invariable, avec infiniment de soins et de précautions. On ne mesure point sa longueur, mais on compte, avec une grande exactitude, le nombre des oscillations qu'il fait dans un temps donné. Supposons qu'un navigateur ait fait le tour du monde avec un pendule de cette espèce, et qu'il l'ait observé en cent endroits différens, sur les sommets des îles, au milieu de l'Océan, sur les grandes côtes des deux mondes, et sur les terres volcaniques. Au retour de son voyage, qu'il vienne à Paris ou à Londres, faire osciller ce même pendule : il en pourra conclure l'intensité absolue de la pesanteur, pour tous les lieux où il a fait ses stations ; car le pendule étant le même, l'intensité de la pesanteur dans un de ces lieux, et l'intensité de la pesanteur à Paris, par exemple, seront entre elles en raison inverse des carrés des temps d'une oscillation. Ce n'est plus qu'une règle de trois, dont un seul terme est inconnu. C'est ainsi que l'on est parvenu à déterminer l'intensité de la pesanteur en plusieurs points de la terre.

M. Biot l'a déterminée, au moyen du pendule absolu, sur plusieurs points du méridien de Paris, dans une étendue d'environ 550 lieues : depuis les îles Baléares, sur les côtes de l'Espagne, jusqu'aux îles Shetland, les plus septentrionales des Orcades ; et aussi, en 1825, en plusieurs points de la Sicile et de l'Italie. D'autres observateurs ont employé le pendule invariable en différens lieux : le capitaine Kater en Écosse et en Angleterre, en 1817 et 1818 ; le capitaine Freycinet, dans un voyage de découvertes autour du monde, de 1817 à 1820 ; le capitaine Duperrey, dans un voyage semblable, de 1822 à 1824 ; et le capitaine Sabine, de 1821 à 1824, dans divers voyages en Afrique et en Amérique, depuis l'équateur jusqu'à la latitude septentrionale de 79°.

Dans le tableau qui termine ce chapitre, nous avons essayé de réunir les résultats de toutes ces observations.

54. *De la Figure de la Terre.* — On sait que les plus hautes montagnes ne sont que de très petites éminences, par rapport au globe de la terre : tels à peu près que seraient des grains de sable, disséminés sur un globe d'un mètre de rayon ; il paraît que les plus grands bassins des mers ne sont que de petites cavités, analogues aux saillies des montagnes. Ainsi, prise dans son ensemble, la surface de la terre est sensiblement régulière, et peut être considérée comme telle dans les calculs. Les plus anciens astronomes avaient reconnu sa courbure, et, comme dans leurs idées la sphère était la forme la plus parfaite, ils n'avaient pas douté que la terre ne fût une sphère très exacte ; on peut même présumer, d'après quelques documens historiques, qu'ils avaient fait de grands efforts pour en mesurer les dimensions, et qu'enfin ils y étaient parvenus d'une manière assez approchée. Cependant la terre n'est point sphérique. Newton avait annoncé qu'elle

est aplatie vers les pôles et renflée à l'équateur, et cette vérité a été démontrée dans le dernier siècle par des mesures directes. Cette découverte, qui a exigé d'immenses travaux, n'est encore qu'un premier pas dans la grande question de la figure de la terre ; après avoir démontré qu'elle n'est pas sphérique, il faut démontrer maintenant de combien elle est aplatie, et reconnaître toutes les irrégularités et tous les accidens qu'elle présente. Pour trouver le poids des planètes et les dimensions du système du monde, il n'a fallu que quelques hommes de génie ; pour trouver la forme exacte de la terre dans toute l'étendue de sa surface, il faut de plus le concours des peuples et des gouvernemens. Cependant, de nombreux voyages heureusement exécutés ; de grandes opérations, les unes terminées avec succès, les autres commencées par des savans habiles et protégées par les gouvernemens des deux mondes ; un grand zèle de toutes parts, chez tous les peuples savans, tout semble annoncer que le problème de la figure de la terre sera enfin résolu, et que sa solution sera un des momens scientifiques de notre siècle.

Si la terre était solide dans toute sa masse, ou seulement dans toute la couche extérieure qui sert d'enveloppe aux parties centrales, elle pourrait avoir une forme quelconque, et n'être ni sphérique ni sphéroïdale : seulement, il y aurait un certain rapport entre sa forme et les périodes de ses mouvemens. Au contraire, si la terre était toute fluide, elle aurait nécessairement la forme d'un sphéroïde, ou d'une sphère aplatie aux deux pôles ; car la force centrifuge, qui résulte du mouvement de rotation qu'elle accomplit sans cesse sur son axe, repoussant le fluide de plus en plus, l'accumulerait vers les régions de l'équateur, où elle le soutiendrait à un niveau plus élevé. Le globe entier de la terre étant composé en même temps, des substances solides qui forment les continens et les montagnes, et de la masse fluide qui remplit les bassins des mers, on voit qu'il y a deux questions à se proposer sur la figure de la terre : savoir : quelle est la forme générale de la surface solide des continens, et quelle est la forme de la surface des eaux. Pour celle-ci, il faut bien qu'elle soit renflée à l'équateur, car rien ne s'oppose à l'effet actuel de la force centrifuge : les eaux de l'Océan cèdent à son action, malgré les îles et les sinuosités des grandes côtes, à peu près comme elles feraient si elles avaient leur niveau élevé de plusieurs mille mètres au-dessus des sommets des montagnes. Ainsi, si tout à coup le mouvement de rotation de la terre était arrêté, on verrait à l'instant l'excès des eaux soulevées par la force centrifuge se précipiter de l'équateur vers les pôles. À l'équateur le niveau baisserait, non pas de quelques mètres, mais probablement de quelques lieues ; les rescifs et les hauts-fonds deviendraient des sommets de montagnes et des plateaux élevés ; les flancs de la mer seraient d'immenses collines ; et sans doute,

dans une vaste étendue de pays, le fond de la mer lui-même formerait des plaines et des vallées. Au pôle arriverait un déluge : les continents seraient submergés, les montagnes de glace seraient arrachées et soulevées par les eaux; elles deviendraient flottantes comme des vaisseaux, et sans doute, au milieu de cette désolation, elles seraient le refuge le plus assuré; mais ce n'est que vers les pôles que l'on peut naviguer avec des vaisseaux de cette espèce.

Pour nous, dans notre région moyenne, nous n'aurions pas de grands changements à redouter; entre un déluge vers le nord et un affaissement des eaux vers le midi, la mer Méditerranée et la Manche resteraient à peu près à leur niveau. Seulement, nous verrions passer sur nos côtes cette prodigieuse marée, allant du midi vers le nord, emportant sous les pôles d'immenses débris de la zone torride; et peut-être aurions-nous à craindre qu'en passant elle n'en couvrit nos terres. Dans l'hypothèse d'une fluidité complète, le niveau baisserait à l'équateur de 6967 mètres, il s'élèverait au pôle de 13915^m, il resterait le même à la latitude de 35-16°, et à Paris ils s'élèverait de 2000 mètres au-dessus de la plate-forme de l'Observatoire. Telle est, dans l'équilibre général, l'influence de la force centrifuge qui résulte du mouvement de rotation de la terre; et telle est l'idée que nous pouvons prendre de cette cause permanente qui maintient la surface mobile de la mer, toujours renflée à l'équateur et aplatie vers les pôles.

Quant à la forme générale de la surface solide des continents, il résulte aussi des observations qui ont été faites, qu'elle est elle-même aplatie comme la surface des eaux, ou à peu près; c'est-à-dire qu'elle offre la même courbure que si le globe entier de la terre, ayant été fluide autrefois, ne se fût consolidé qu'après avoir tourné sur lui-même, comme il tourne aujourd'hui, et après avoir reçu la forme qui résulte nécessairement de ce mouvement de rotation. Une preuve frappante de l'aplatissement de la surface continentale, c'est que les montagnes des régions polaires ne sont pas très élevées au-dessus du niveau de la mer; et cependant si la surface de la terre était sphérique, tandis que la surface des eaux est aplatie, on voit qu'à l'équateur les montagnes devraient être moins hautes qu'au pôle de toute la valeur de l'aplatissement, c'est-à-dire de 4 à 5 lieues; tandis qu'il paraît au contraire que les montagnes de l'équateur restent encore plus élevées que celles du pôle.

Si l'on était sûr qu'en effet la terre eût été autrefois fluide, on pourrait calculer l'aplatissement qu'elle a dû prendre, et par conséquent l'aplatissement qu'elle conserve aujourd'hui; on du moins on pourrait calculer les limites entre lesquelles il resterait compris, en faisant toutes les hypothèses plausibles sur la densité des couches intérieures. Alors il serait curieux de la mesurer dans toutes ses dimensions, pour vérifier cette belle déduction

des principes et des lois de la mécanique. Mais l'incertitude où nous sommes sur les époques qui remontent au-delà de quelques siècles, donnent encore plus d'importance à ces mesures directes; car si la terre n'a pas été fluide, il est possible qu'elle soit inégale et bosselée, et que sa surface, au lieu d'être régulièrement aplatie, comme celle d'un sphéroïde, soit simplement aplatie par quelques causes accidentelles, et qu'elle offre du reste de grandes inégalités, dépendant de l'inégale distribution et de l'inégale densité des matières intérieures. Ainsi, dans tous les cas, la détermination directe de la figure de la terre est une des plus curieuses et des plus importantes questions que nous puissions nous proposer. On essaie de la résoudre par deux moyens: par les opérations géodésiques et par les observations du pendule.

56. Pour exécuter les mesures géodésiques, on choisit, dans une grande étendue de pays, des points remarquables, comme des crêtes de montagnes, des pointes de clocher, ou des sommets d'édifice, de la fixité desquels on soit très assuré. On les choisit de telle manière que, de chacun, on puisse en apercevoir au moins deux autres. Enfin on mesure, avec toute la précision possible, une longue base dont les deux extrémités deviennent des points fixes analogues aux précédents. Alors tous ces points sont enchaînés par des triangles, c'est-à-dire que l'observateur passe successivement à chacun d'eux, qu'il dirige un rayon visuel à tous les autres points qui, de là, peuvent être visibles, et qu'il mesure avec un grand soin les angles que tous ces rayons visuels font entre eux. On conçoit qu'une pareille chaîne de triangles puisse s'étendre et se prolonger aussi loin que vont les continents; on conçoit même qu'on puisse la faire passer sur la mer, pourvu que de chaque rivage on aperçoive quelques points sur le rivage opposé. C'est ainsi que, sur toute la France, un réseau de triangles enchaîne tous les points les plus remarquables. Il en est de même en Angleterre, en Allemagne, en Italie; et de grandes opérations de cette nature se continuent dans le reste de l'Europe, en Amérique, et jusque dans l'Inde, où la Compagnie des Indes prend aussi une part active à la mesure de la terre.

Si cette vaste entreprise était terminée, nous connaîtrions la figure du globe, comme on propriétaire connaît le plan de son domaine; et il n'est personne qui ne comprenne les avantages prodigieux d'une telle connaissance, non-seulement pour la théorie de la terre, mais encore pour les grandes entreprises industrielles et commerciales.

Nous sommes encore loin d'être arrivés à ce point; mais déjà de diverses triangulations locales, exécutées au Pérou, en Pensylvanie, en Italie, en France, en Suède, et au Cap de Bonne-Espérance, on peut conclure d'une manière certaine que la terre est aplatie, et même on peut avoir une première approximation de son aplatissement. On sait, par exemple, que sur le méridien de Paris la verticale

du parallèle de Formentera et celle du parallèle de Dunkerque font entre elles un angle de $12^{\circ} 22' 14''$. Ces deux lignes concourent au centre de la terre exactement, ou un peu plus près, ou un peu plus loin. Si, de leur point de rencontre, on décrit un arc de cercle passant par Dunkerque et par Formentera, c'est cet arc qui sera de $12^{\circ} 22' 14''$. Or, de la chaîne des triangles on déduit que la distance de ces deux points, comptée sur cet arc de cercle, ou à très peu près, est, en mètres, de 1374438,72. Donc, si $12^{\circ} 22' 14''$ forment cette distance, un seul degré forme une longueur qui est très facile à trouver; c'est cette longueur que l'on nomme un degré du méridien. Si la terre était sphérique, tous les degrés seraient égaux entre eux et vaudraient le même nombre de mètres, et réciproquement. Donc, ou contraire, si l'on trouve que les degrés sont inégaux, on conclura que la terre n'est pas sphérique. On voit (Fig. 71) que, si elle est elliptique et aplatie vers les pôles, les verticales de l'équateur qui font entre elles un angle de 1° ou de 10° , vont se rencontrer plutôt que les verticales des pôles qui font le même angle; ainsi l'arc de 1° , compris entre les premières, a une moindre longueur, comme appartenant à un cercle d'un plus petit rayon, que l'arc de 1° compris entre les verticales des pôles; d'où il suit que *vice versa*, si on trouve les degrés de l'équateur plus petits que les degrés des pôles, on pourra conclure, avec la plus grande certitude, le fait de l'aplatissement.

Or, des arcs dont chacun avait plusieurs degrés d'étendue, ont été mesurés sur divers méridiens et à plusieurs latitudes : au Pérou, par Bouguer et La Condamine; dans l'Inde, par Lambert; au Cap de Bonne-Espérance, par Lacaille; en Pensylvanie, par Mason et Dixon; en Italie, par Lemaire et Boscovich; en France, par Delambre et Méchain; en Espagne, sur les côtes de la Méditerranée, par Arago et Biot; en Angleterre, près de Greenwich, par Roy, Delambre et Méchain; en Suède, par Melanderhielm. De l'ensemble de ces mesures, il résulte deux conséquences; premièrement, que la terre n'est pas sphérique, puisque les degrés sont inégaux à diverses latitudes, et secondement, que la terre est en effet aplatie vers les pôles, puisque les longueurs des degrés vont en croissant à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur. En combinant ces mesures par diverses considérations géométriques, on en peut déduire les longueurs du rayon de la terre pour les diverses latitudes. On trouve alors les résultats suivants :

Rayon de l'équateur.	6376984	mètres.	ou	1434,8	lieues.
Rayon du pôle.	6356324			ou	1430,1
Différence.	20660			ou	4,7

L'aplatissement est la différence entre les rayons de l'équateur et du pôle divisée par le rayon de l'équateur; il est donc, d'après ces mesures, de $1/308,65$. Le rayon moyen de la terre est celui qui correspond à la latitude de 45° ; on le trouve de

$6366745^m = 1432,4$ lieues. En combinant d'autres mesures, on trouve un autre rayon qui diffère un peu du précédent, et qui est de 6366194. La différence est insensible dans la plupart des applications, puisque 500 mètres ne sont que la dixième partie de la hauteur du Mont-Blanc.

Newton, en supposant que la terre a une densité uniforme, trouvait son aplatissement de $1/230$. Huyghens, en supposant qu'elle a au centre une densité infinie, trouvait $1/578$. M. de La Place, par une théorie plus complète, trouve que l'aplatissement est de $1/305$. Ainsi, non seulement les géomètres ont pu prédire que la terre est aplatie, mais on voit encore que M. de La Place est parvenu, par la seule puissance de la théorie, à trouver la vraie valeur de cet aplatissement; ce résultat est une preuve frappante de la dépendance qui existe entre les divers phénomènes de la nature, puisque c'est sur les inégalités des mouvements de la lune, que M. de La Place a fondé ses calculs.

55. Les observations du pendule peuvent servir à déterminer la figure de la terre, en supposant qu'elle est en effet un sphéroïde, composé de couches homogènes, dont la densité varie de l'une à l'autre suivant une loi quelconque : car dans cette hypothèse :

A étant l'aplatissement,

Q la longueur du pendule à l'équateur,

D l'excès de la longueur du pendule au pôle sur sa longueur à l'équateur,

On démontre que ces trois quantités sont liées entre elles par la relation suivante :

$$A = 0,00865 - \frac{D}{Q}$$

Le nombre constant 0,00865 est les $5/2$ du quotient de la force centrifuge à l'équateur par la pesanteur.

Il suffirait donc de déterminer les longueurs du pendule à secondes à l'équateur et au pôle : la première longueur donnerait Q, l'excès de la seconde sur la première donnerait D, et il n'y aurait plus à faire qu'une division et une soustraction pour avoir l'aplatissement. On peut même simplifier encore l'opération et se dispenser d'aller au pôle; car, dans l'hypothèse précédente, la pesanteur décroissant, suivant une certaine loi, depuis le pôle jusqu'à l'équateur, il faut que les longueurs des pendules décroissent aussi suivant la même loi; d'où il résulte une relation déterminée entre toutes les longueurs des pendules des diverses latitudes. Cette relation est la suivante :

$$l = Q + D \sin^2 \lambda$$

Q et D sont les mêmes que dans la formule précédente,

λ est la latitude,

l est la longueur du pendule à la latitude λ .

Ainsi, au lieu d'observer le pendule à l'équateur et au pôle, on peut l'observer à deux latitudes

quelconques, pourvu qu'elles soient assez éloignées l'une de l'autre, mettre successivement pour chacune des longueurs que l'on trouve, et pour la latitude correspondante; de la sorte on obtient deux équations d'où l'on tire les valeurs de Q et de D ; et ces valeurs, substituées à leur tour dans la première formule, donnent la grandeur de l'aplatissement. Toutes ces observations, prises deux à deux, quel que soit le lieu où elles aient été faites, devraient, pourvu qu'elles fussent exactes, donner les mêmes valeurs de Q et de D , et par conséquent conduire à la même valeur définitive de l'aplatissement de la terre. D'après cela, on pourrait penser que deux seules observations fussent, et qu'il n'est pas besoin de se donner tant de peine, ni de tant courir les mers et les continents pour observer le pendule sous toutes les latitudes et dans tous les climats. Mais il faut prendre garde, d'une part, que les formules que nous employons reposent sur des hypothèses qui peuvent plus ou moins s'écarter de la vérité, et que c'est là le point fondamental qu'il faut décider; et, d'une autre part, que les moyens d'observation, quelque précis qu'ils soient, ne peuvent donner un résultat certain quo par une moyenne entre plusieurs résultats peu différents.

Les observations du pendule qui ont été faites jusqu'à ce jour dans les deux hémisphères, et à des latitudes très différentes, depuis l'équateur jusqu'à la dernière ville septentrionale du monde, et même jusqu'aux régions glacées du Groënland et du Spitzberg, donnent pour l'aplatissement des résultats qui ne sont pas absolument conformes aux résultats qui se déduisent des inégalités de la lune, ou des mesures géodésiques. Les différences sont petites; car les moindres valeurs donnent près de $1/305$, qui est le nombre de la théorie, et les plus grandes valeurs ne dépassent pas $1/240$; mais elles suffisent cependant pour qu'on puisse conclure dès à présent : 1° que la nature du sol sur lequel on fait les observations a une influence sensible sur les oscillations du pendule; 2° qu'elle a par conséquent une influence plus ou moins marquée sur l'équilibre et sur le nivellement des eaux; 3° enfin, quo par ces causes la surface de la mer a très probablement des inégalités plus ou moins grandes, des éminences et des affaissements, qui ne l'empêchent pas d'être aplatie dans sa direction générale, à peu près comme l'indique la théorie, mais qui l'empêchent d'être une surface géométrique, exactement pareille à celle d'un ellipsoïde de révolution. Ainsi, quelles que soient les causes qui aient agi, à l'origine du monde, et quelles que soient celles qui aient pu se développer dans les catastrophes qui ont suivi, il arrive, comme on pouvait s'y attendre, que dans le sein de la terre toutes les matières ont été confondues, et que, plus pesantes ou plus légères, elles sont à peu près uniformément réparties dans toute l'étendue de chacune des couches. Il fallait qu'il en fût ainsi pour la ré-

gularité des mouvements et pour l'ordre des saisons, car les phénomènes se passeraient d'une tout autre manière, si l'un des hémisphères était, par exemple, léger comme du liège, et l'autre lourd comme du plomb. Cependant cette homogénéité générale n'empêche pas qu'il ne se rencontre, dans le globe de la terre, quelque hétérogénéité locale qui ait déformé sa surface, et qui ait produit, de distance en distance, quelque dépression ou quelque renflement.

Le tableau général qui termine ce chapitre pourra faciliter toutes les discussions auxquelles on peut se livrer sur ce grand problème de la figure de la terre. On y doit distinguer deux choses, qui sont véritablement très distinctes, savoir : 1° les longueurs du pendule, d'où l'on peut déduire les intensités de la pesanteur aux différentes stations, ce qui est indépendant de toute hypothèse; et 2° les différences qui se trouvent entre ces résultats et ceux de la théorie, ce qui est dépendant des hypothèses que la théorie porte avec elle.

66. *Déviation du fil à plomb par l'attraction des montagnes.* — Toutes les portions de la matière étant attirées l'une vers l'autre, on ne voit pas d'abord pourquoi de grandes masses, telles que des montagnes, n'exercent pas d'action sensible sur les corps qui les environnent. Pourquoi, par exemple, quand on laisse tomber une pierre du haut d'un sommet élevé, cette pierre, en tombant, ne se dirige pas vers le centre de la montagne qui est très près, plutôt que vers le centre de la terre qui est très loin. On peut même s'étonner que les murs d'un édifice ne produisent pas cet effet, et que, dans un appartement, un corps qui est suspendu en haut ne tombe pas sur le plafond plutôt que de tomber sur le plancher : à peu près comme aux antipodes, les corps tombent ou remontent vers nous. Mais dès qu'on prend garde que la plus grosse montagne n'est qu'un grain de sable, quand on la compare à la terre, on ne s'étonne plus que les montagnes ordinaires ne puissent pas attirer à elles les corps que la terre attire elle-même. L'effet qu'elles pourraient produire serait tout au plus de les dévier un peu dans leur chute. Réciproquement, si elles peuvent produire quelques déviations, on pourra être assuré que la pesanteur est, comme nous l'avons dit, une force universelle qui agit sur toute la matière, et qu'il n'y a ni tourbillon autour de la terre, ni vertu particulière vers son centre, par quoi les corps soient poussés, ou sympathiquement précipités.

Bouguer est le premier qui ait l'idée de chercher, dans l'attraction des montagnes, une preuve de l'attraction universelle de la matière; si elles agissent, elles doivent dévier le fil à plomb. Mais comment reconnaître si le fil à plomb est dévié? la même cause qui changerait sa direction changerait aussi celle de la surface des eaux tranquilles, à laquelle on la rapporte; et dès lors on ne pourrait

plus juger ni de l'un ni de l'autre éhangement. Aussi faut-il avoir reconra aux étoiles : c'est encore dans lo ciel qu'il fant chercher une direction fixe pour les expériences de cette nature. C'est sur les Banos du Chimborazo, qui est une des plus grandes montaignes de la terre, que Bouguer fit son expérience. Il y rencontra des obstaules infinis, à cause de l'âpreté des lieux et des tempêtes terribles qu'il eut à essayer dans ces hautes régions. Cependant il accomplit son dessein et trouva dans lo fil à plomb une déviation de 7' ou 8'. Ces montaignes volcaniques ont sans doute d'immenses cavités qui réduisent do beaucoup l'énergie do leur action.

Depuis Bouguer, on a répété les expériences en divers lieux : Maskeline, en 1772, les a surtout répétées avec do grandes précautions, au pied des moutis Shéhalliens, en Écosse, où il a trouvé une déviation de 54". Il en résulte que certainement les montaignes agissent sur lo fil à plomb, et qu'elles lo dévient d'une quantité sensible, qui dépend de leur volume et do la nature des substances qui les composent. Maskeline avait fait ces expériences pour en déduire lo rapport de la masse de la terre à celle de la montagne, et, par suite, la densité de la terre elle-même; il trouva de cette manière que la densité de la terre, prise dans son ensemble, est 4,56, ou à peu près quatre fois et demie la densité de l'eau. C'est, je crois, la première notion que l'on ait eue sur la nature des substances qui composent les couches centrales do globe.

57. En 1824, M. Carlini a fait des observations d'une autre espèce, qui l'ont conduit à peu près au même résultat. Il a observé le pendule au sommet du Mont-Cénis, et il a trouvé, pour sa longueur réduite au niveau do la mer, 993^m,708; ensuite, prenant la longueur du pendule de Bordeaux, déterminée par M. Biot, et la réduisant à la latitude du Mont-Cénis, il a trouvé 993,498. La différence est 0^m,210, quo M. Carlini attribue à l'action de la montagne. Le Mont-Cénis forme à peu près un segment do sphère, dont la base a pour diamètre la distance de Susa à Lanslebourg, on à peu près 11 milles géographiques, tandis quo la *flèche* n'est quo la onzième partie de cette distance ou un mille; d'après cela, on peut calculer son volume. Les substances qui lo composent sont lo marbre et lo gypse, dont la densité moyenne est 2,66, ce qui permet do calculer sa masse. Avec ces éléments on peut comparer l'action de la montagne, dont on connaît lo volume et la masse, à l'action de la terre, dont on ne connaît que lo volume, et par conséquent on en peut tirer la densité moyenne de la terre. M. Carlini a trouvé qu'elle est de 4,39, résultat qui ne diffère guère du résultat précédent trouvé par Maskeline.

Le pendule quo M. Carlini a employé était un pendule absolu, dont la boule était suspendue à la manière de Boscovich, et dont lo couteau était remplacé par une petite rondelle d'acier, do poids

de 10 grains, très affilée sur ses bords, et par conséquent ne touchant lo plan d'agate quo par un seul point; les oscillations se faisaient perpendiculairement au plan de la rondelle.

58. Enfin, nous devons à Cavendish une autre détermination de la densité moyenne de la terre. Son appareil paraît être le plus exact quo l'on puisse employer à cette recherche. La première idée do sa construction est due à Michell, do la Société royale do Londres : Michell n'ayant pas eu le temps d'achever ses expériences, et voyant sa fin approcher, légua son appareil à l'honorable *Francis-John-Hyde-Wellaston*, professeur à Cambridge, et celui-ci, à son tour, en fit don à Cavendish, qui était déjà compte parmi les premiers physiciens de l'Angleterre. Voici l'idée principale sur laquelle repose ce procédé : si l'on avait une grande boule de métal do 10 pieds de rayon, il est clair qu'elle ne pourrait pas dévier lo fil à plomb, puisque les montaignes ne lo dévient que de quelques secondes; mais si au lieu d'un fil vertical sur lequel agit la pesanteur, on lui présentait au niveau do son centre, un levier horizontal, bien équilibré et parfaitement mobile, il est clair qu'elle devrait l'attirer à elle et lo faire tourner, puisque la pesanteur serait alors sans effet pour contrarier son action. Le levier horizontal serait donc une espèce do pendule, qui oscillerait par l'attraction do la boule, comme le pendule ordinaire oscille par l'action de la terre. Si même, au lieu d'une boule, on en mettait deux, agissant chacune sur l'une des extrémités du levier, on voit que l'effet serait doublé; ainsi, par ce moyen, en prenant des boules assez grosses et des leviers assez mobiles, on peut sans doute rendre sensible l'action de la matière sur la matière, et produire en petit, autour do ces sphères do métal, ce qui se produit en grand autour do globe de la terre.

L'appareil do Cavendish est représenté dans les figures 60 et 61. La figure 60 on représente la projection horizontale. S et S' sont les deux sphères do métal : elles étaient en plomb et pesaient chacune 167^{lb}, 925. o b c d représente la section d'une caisse dans laquelle on avait enfermé le levier mobile pour lo garantir complètement de toutes les agitations de l'air. s et s' sont deux petites balles suspendues aux deux extrémités du levier mobile et parfaitement en équilibre.

La figure 61 est une coupe verticale, les mêmes lettres désignent les mêmes choses; on voit ici comment les deux petites balles sont suspendues par un fil d'argent qui traverse les extrémités du levier; ce fil vient en a s'attacher au fil vertical ff' dont la ténacité est assez grande pour porter lo fléau et les balles s et s', et dont la torsion est la seule force qui s'oppose aux oscillations. Les deux masses S et S' sont elles-mêmes suspendues par des tiges do fer, et peuvent tourner autour de la caisse; elles passent successivement des positions S et S' figurées en lignes pleines, aux positions S₁ et S'₁ figurées en

lignes ponctuées : elles y sont conduites par une manœuvre qui s'exécute du dehors. Enfin tout l'appareil est enfermé dans une chambre sans portes et sans fenêtres, il n'est éclairé que par une petite ouverture, au moyen d'une lampe F, placée en dehors des murs pour ne pas échauffer l'air intérieur; et c'est avec la lunette *M* que l'on observe les mouvements qui se produisent.

Tout étant en repos et les masses S et S' étant dans la situation où elles n'agissent pas, c'est-à-dire dans la situation perpendiculaire au levier mobile, on les fait tourner pour les mettre dans la situation de la figure 61, alors le levier se met à tourner, les petites balles *s* et *s'* sont attirées chacune vers la boule correspondante, et les oscillations commencent. C'est une preuve bien irrévocable que la matière attire la matière, et que les petites balles *s* et *s'* tendent à tomber sur les grandes sphères de plomb, par la même puissance qui les fait tomber sur la terre, et que s'il y a une différence elle provient seulement de la différence des masses. Ce fait fondamental une fois prouvé, il ne reste plus qu'à observer la durée des oscillations des petites balles, la longueur du levier à l'extrémité duquel elles oscillent, et leur distance au centre des grandes sphères S et S', qui peuvent être considérées comme les centres d'attraction. Ensuite, après avoir corrigé les résultats des effets de la torsion du fil de suspension, l'on arrive à connaître l'effet d'une sphère de plomb du poids de 157¹/₂ 925, pour faire osciller un pendule simple d'une longueur connue, et placé à une distance connue de son centre. La question étant amenée à ce point, il n'y a plus que des proportions à

faire pour avoir la masse de la terre, comparée à la masse du globe de plomb; car ces masses sont entre elles comme les longueurs des pendules simples qui battent la seconde, étant placés à une même distance de leur centre. Dans cette proportion tout est connu excepté la masse de la terre, que l'on peut par conséquent en déduire; on connaît d'ailleurs son volume par les mesures de l'arc du méridien, et en divisant la masse par le volume, on obtient enfin sa densité moyenne. Pour dernier résultat de ces belles expériences, Cavendish trouve que la densité moyenne de la terre est de 5,48, c'est-à-dire à très peu près cinq fois et demie la densité de l'eau.

Connaissant la densité de la terre et son volume, il est facile de trouver combien elle pèse de kilogrammes, ou plutôt en combien de kilogrammes on trouverait, si l'on pouvait successivement prendre par petits fragments, d'un mètre cube, par exemple, toutes les substances qui la composent pour les peser dans une balance, à Londres ou à Paris, et si l'on pouvait les remettre en place après les avoir pesées. Car, d'après ce que nous venons de voir sur l'attraction générale de la matière, nous pouvons être sûrs quand nous faisons une pesée, que toutes les molécules du globe contribuent à faire pencher la balance.

Par les observations et par les calculs astronomiques, on évalue les masses des planètes et celle du soleil au moyen de la masse de la terre; d'où il suit qu'avec le poids de la terre nous pouvons trouver le poids de toutes les planètes. Ainsi le petit appareil de Cavendish est une balance dans laquelle on peut peser le monde.

TABLEAU**DES OBSERVATIONS DU PENDULE.**

LONGUEUR du PENDULE CALCULÉ par l'ensemble de toutes les observations.	AVANCE ou RETARD EN SECONDES du pendule calculé sur le pendule observé.	HAUTEUR à laquelle il faudrait pla- cer le pen- dule, pour qu'il fût d'ac- cord avec le pendule calculé.	OBSERVATIONS.
(6)	(9)	(10)	
993,90017	— 0"30	+ 169	(3) Cette colonne contient les longueurs du pendule, telles qu'elles ont été données par les observateurs. Pour Borda, l'unité est la ligne; pour M. Biot, elle est le millimètre; mais son pendule est le pendule décimal; pour MM. Freycinet et Duperrey, l'unité est la longueur du pendule de Paris; pour MM. Kater et Sabine, l'unité est le ponce anglais.
994,68786	+ 0,56	— 168	(5) Cette colonne contient toutes les longueurs du pendule sexagésimal, exprimées en millimètres et réduites au niveau de la mer, par la formule ordinaire $l = \frac{g}{4\pi^2} T^2$.
994,50960	+ 0,93	— 68	Nous devons adopter le mode uniforme de réduction, pour discuter l'ensemble des observations.
994,09189	— 0,50	+ 37	(7) Il est curieux de connaître l'avance ou le retard qu'éprouverait en un jour moyen le pendule à secondes, de Paris, en le supposant transporté successivement sur la verticale de toutes les autres stations et au niveau de la mer. C'est ce qui est exprimé dans la colonne. Le signe + indique que le pendule de Paris serait en avance, et le signe — qu'il serait en retard.
993,90017	+ 1,43	+ 105	(8) Cette colonne contient les longueurs du pendule à secondes, calculées par l'ensemble de toutes les observations, en les combinant par la méthode des moindres carrés, qui donne la formule
993,62055	— 0,09	+ 154	
993,54740	+ 4,11	+ 303	
993,53781	— 3,21	+ 222	
993,00553	— 1,97	+ 94	
994,68710	+ 2,28	— 166	
994,64791	+ 1,86	— 137	
994,50969	+ 1,13	— 83	
994,39972	+ 0,09	— 7	
994,19346	+ 1,26	— 94	
994,13360	— 0,43	+ 33	
994,05610	— 0,39	+ 29	
993,90017	— 1,43	+ 105	(9) Cette colonne contient la différence qui a lieu en chaque station, entre les nombres d'oscillations que le pendule calculé et le pendule observé peuvent exécuter en un jour. On voit que ces différences sont en général assez petites, d'où il résulte que la courbe, calculée par l'ensemble des observations, représente chacune de ces observations d'une manière assez approchée. Cette courbe donne un aplatissement de $\frac{1}{185}$. La plus grande différence positive est 7"45: elle correspond à l'île-de-France; c'est un fait très remarquable, que les observations du capitaine Duperrey s'accordent, avec celles du capitaine Freycinet, à donner une différence aussi forte. S'il est permis de conclure quelque chose sur la forme de la terre au moyen des observations du pendule, il faudrait conclure qu'à l'île-de-France il y a dans le sol une densité locale très considérable, ou une grande dépression de niveau. La plus grande différence négative est de — 6"18; elle correspond à Maranham, qui offrirait, d'après les mêmes conséquences, un sol très léger ou un niveau très relevé, ou peut-être les deux circonstances à la fois. Le capitaine Sabine a, en effet, observé que Maranham est un terrain d'alluvion très peu dense.
91,66916	+ 5,06	+ 373	(10) Cette colonne contient la hauteur en mètres à laquelle s'élève en chaque lieu le niveau de la mer calculé au-dessus du niveau réel, ou la profondeur à laquelle il s'enfonce. Ainsi, à l'île-de-France, la surface de la terre serait déprimée de 500 mètres, et à Maranham serait trop élevée de 455 mètres. Il résulte de cette discussion, 1° que les observations du pendule réunies dans ce tableau offrent entre elles un accord remarquable, ce qui prouve que les observateurs ont atteint à un degré d'exactitude satisfaisant; 2° que l'aplatissement que l'on en peut déduire par la formule de Clairaut, est sensiblement plus grand que l'aplatissement $\frac{1}{230}$ donné par la théorie de la lune; 3° enfin, que la terre semble présenter en plusieurs de ses points de légères variations dans l'intensité de la pesanteur, qui tiennent sans doute à une action locale des couches de la superficie, ou à une irrégularité de forme, ou peut-être à ces deux circonstances réunies.
91,30053	+ 6,18	+ 435	
91,12911	+ 3,16	+ 353	
91,13615	— 1,73	+ 128	
91,79876	— 5,98	+ 440	
91,28180	— 3,38	+ 242	
91,50653	— 1,42	+ 104	
91,16334	— 0,63	+ 46	
94,15360	— 0,43	+ 33	
91,06984	— 2,72	+ 200	
91,54163	— 0,03	+ 8	
91,73699	+ 0,50	+ 37	
91,93941	+ 4,19	+ 309	
3,90017	— 1,43	+ 105	
3,39514	— 0,40	+ 30	
1,10185	+ 2,63	— 154	
1,63773	+ 6,11	+ 459	
2,60019	— 0,53	+ 37	
4,13446	— 0,22	+ 16	

CHAPITRE V.

DE L'HYDROSTATIQUE.

59. L'objet de l'hydrostatique est de déterminer les conditions d'équilibre des liquides, et les pressions qu'ils exercent sur les parois des vases qui les contiennent.

Les propriétés des liquides dépendent de deux forces : de la pesanteur qui agit sur eux comme sur tous les corps, et de l'attraction moléculaire qui agit sur eux d'une manière déterminée pour les constituer à l'état liquide. Nous pouvons distinguer par la pensée ce qui appartient à chacune de ces forces ; car nous pouvons imaginer une masse d'eau qui cesse un moment d'être pesante, sans pour cela cesser d'être liquide ; une telle masse ne pourrait plus ni tomber quand on l'abandonne, ni couler quand on la verse, et il est évident qu'elle n'aurait plus besoin pour être en repos, ni d'être soutenue sur le sol, ni d'être contenue dans un vase. Dans cet état, elle aurait encore un grand nombre de propriétés particulières qu'il serait curieux d'étudier, et parmi lesquelles la plus importante est celle qui est connue sous le nom de *Principe d'égalité de pression*.

60. *Principe d'égalité de pression.* Les liquides sont soumis au principe d'égalité de pression, c'est-à-dire qu'ils ont la propriété de transmettre dans tous les sens et également les pressions qu'on exerce à leur surface.

Ce principe est un axiome de physique : mais s'il n'est pas nécessaire de le démontrer, il est au moins nécessaire de le faire comprendre. ABCD (Fig. 72) est un vase qui contient un liquide supposé sans pesanteur, P P' est un piston solide qui en couvre exactement toute la surface. Si le piston est aussi sans pesanteur, et s'il n'est chargé d'aucun poids, il est clair que le liquide n'éprouve aucune pression, et que l'on pourrait percer le vase sans qu'il s'écoulât ; mais dès qu'on pose sur le piston un poids de 100 kilogrammes, par exemple, à l'instant il fait effort pour descendre, et descendrait en effet, si le liquide ne s'y opposait pas. Que le liquide soit compressible ou qu'il ne le soit pas du tout, le résultat est le même : il faut de toute nécessité qu'il s'élève jusqu'à ce qu'il porte les 100 kilogrammes. La couche supérieure aa' qui touche au piston et qui le soutient, en supporte donc tout le poids ; et, pressée comme elle est, elle tomberait nécessairement si elle n'était pas soutenue par la couche bb' qui est au-dessous d'elle ; elle presse sur cette couche autant qu'elle est elle-

même pressée par le piston. De même la couche bb' presse sur la suivante cc', et ainsi de suite, la pression se communiquant de proche en proche jusqu'au fond du vase, qui est lui-même pressé comme si le piston reposait immédiatement sur lui. Puisque c'est toute la surface du fond qui porte cette pression de 100 kilogrammes, il est visible que la moitié de la surface ne porte pour sa part que 50 kilogrammes, et que la centième partie de sa surface ne porte que la centième partie de la pression totale, c'est-à-dire un seul kilogramme. Ainsi :

1°. La pression se transmet de haut en bas sur les surfaces horizontales sans rien perdre de sa force.

2°. Elle est égale en chaque point.

3°. Elle est proportionnelle à l'étendue de la surface que l'on considère.

Sur les faces latérales le même phénomène a lieu : car, si en un point quelconque on faisait une ouverture, le liquide jaillirait, et si l'on découpait une partie de la surface elle serait poussée dehors ; enfin, si la portion que l'on découpe était égale à toute la largeur du piston, il ne faudrait pas moins de 100 kilogrammes pour la tenir en place, et si elle n'avait qu'une étendue cent fois moindre, il ne faudrait qu'un effort d'un kilogramme. Si le piston lui-même était percé d'un trou, le liquide jaillirait de bas en haut, ce qui prouve que sa paroi est elle-même pressée comme le sont toutes les autres ; ainsi les liquides transmettent dans tous les sens et également les pressions qu'on exerce à leur surface.

Après avoir compris ce principe pour des liquides sans pesanteur, il est facile de voir qu'il s'applique sans réserve aux liquides pesants, mais qu'alors il y a des pressions qui s'exercent sur chaque molécule, et qui résultent de la pesanteur qui leur est propre.

61. *De l'équilibre des liquides pesants.* Il y a deux conditions pour l'équilibre des liquides : il faut premièrement que les molécules supérieures et inférieures forment une surface perpendiculaire à la force qui les sollicite ; et secondement qu'une molécule quelconque de la masse éprouve dans tous les sens des pressions égales et contraires.

Première condition d'équilibre. Supposons que la surface ne soit pas perpendiculaire à la force qui sollicite les molécules liquides, qu'elle soit par

exemple dans la direction $a b c d e$, tandis que la force est dirigée suivant les verticales $o e$ (Fig. 73). Alors une petite couche horizontale, telle que $b d$, serait pressée de tout le poids des molécules qui sont au-dessus d'elle; cette pression, comme nous venons de le voir, se transmettrait latéralement, et la molécule b , poussée par cette pression latérale, serait poussée dehors, puisqu'il n'y a rien qui la retienne; elle sortirait donc : une autre viendrait, qui prendrait sa place, et qui serait poussée à son tour; et ainsi de suite, jusqu'à ce que la courbure $b c d e$ se fût affaïssie, et fût devenue tout-à-fait horizontale. Il en arriverait de même de toute portion de liquide qui serait au-dessus d'un autre point quelconque de la surface, et l'équilibre ne peut avoir lieu que quand les molécules libres ne peuvent plus tomber, c'est-à-dire quand elles sont toutes rangées sur une même surface perpendiculaire à la force.

En appliquant ce principe à la surface de la mer, supposée parfaitement calme, il nous sera facile de prendre une idée de sa courbure et des causes qui la déterminent. Si toutes les directions de la pesanteur concouraient exactement au centre de la terre, et si cette force était la seule qui sollicitât les molécules liquides, il faudrait que dans tous les bassins de toutes les mers la surface libre des eaux prît la forme sphérique; car il n'y a que cette surface qui soit perpendiculaire à tous les rayons qui concourent en un point. Il faudrait de plus que toutes les plages fussent à la même distance du centre de la terre, car sans cela elles ne seraient pas au même niveau, et l'eau des plus élevées tomberait sur les plus basses.

C'est cette condition nécessaire de l'équilibre des masses fluides qui explique ce que nous avons annoncé dans le chapitre premier, sur la direction de la pesanteur; il faut bien que cette force soit perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, puisque c'est elle-même qui oblige les eaux à se ranger dans cette direction.

Quand les molécules liquides sont sollicitées par quelque autre force que par la pesanteur terrestre, on conçoit que pour l'équilibre elles ne doivent plus former une surface perpendiculaire à la pesanteur seulement, mais une surface perpendiculaire à la résultante de la pesanteur et de toutes les autres forces qui agissent avec elle. Ainsi, la force centrifuge, qui résulte du mouvement de rotation de la terre, se combinant sans cesse avec la pesanteur pour solliciter tous les corps, il faut que la surface des eaux s'arrange pour être perpendiculaire à la résultante de ces deux forces, et voilà pourquoi la surface de la mer est aplatie vers ses pôles. Au pied des grandes montagnes, dont la masse est capable de dévier le fil à plomb, la surface des eaux est aussi déviée de sa forme régulière; elle se soulève et s'incline sur la véritable verticale, pour se mettre perpendiculaire à la résultante des actions de la terre et de la montagne. De même

encore, quand la lune passe au-dessus ou au-dessous de l'horizon de la mer, la force attractive qu'elle exerce sur les eaux se combine avec la pesanteur pour produire une résultante qui n'est plus verticale; et c'est ainsi que la surface mobile de l'Océan, cherchant un équilibre qu'elle ne saurait trouver, à cause du mouvement de rotation de la lune, se soulève et se déprime tour à tour, et accomplit enfin les oscillations périodiques du flux et du reflux.

Il se présente dans la nature beaucoup d'autres phénomènes qui semblent n'avoir aucun rapport avec les marées, et qui dépendent cependant d'un principe analogue : on sait, par exemple, que dans un verre ordinaire la surface de l'eau n'est pas plane dans toute son étendue, mais qu'elle se relève près des bords, comme le représente la figure 74; au contraire, la surface du mercure se déprime au contact des parois et semble craindre de les toucher (Fig. 75). C'est que la pesanteur n'est pas alors la seule force qui agisse sur les liquides; avec elle il y a deux autres forces : la force attractive que leurs molécules propres exercent l'une sur l'autre, et la force attractive qu'elles exercent sur la matière du vase. C'est à la résultante de ces trois forces que la surface liquide doit être perpendiculaire, et c'est surtout du rapport d'énergie qui existe entre les deux dernières que dépend l'inflexion qu'elle éprouve au-dessus ou au-dessous de la ligne de niveau. Nous verrons sortir de ce principe toute cette classe de phénomènes qui sont connus sous le nom de *phénomènes capillaires*, et dont nous devons traiter dans un des livres suivants.

62. Pression sur les fonds des vases et sur leurs parois latérales. Du principe de l'égalité de pression, et de la première condition d'équilibre, dont nous venons de parler, résultent plusieurs conséquences très importantes.

1^o. La pression qui s'exerce sur le fond d'un vase est égale au poids d'une colonne liquide, qui aurait pour base le fond lui-même, et pour hauteur, la hauteur du niveau; cette vérité est frappante quand le vase est cylindrique (Fig. 77). Les parois latérales n'éprouvant que des pressions perpendiculaires, ne sont alors poussées ni en haut ni en bas; elles ne peuvent donc ni décharger le fond ni le surcharger, et il faut qu'à lui seul il porte toute la charge, c'est-à-dire tout le poids du liquide contenu dans le vase. Au reste, on peut le prouver aussi par l'expérience : au fond du vase cylindrique ABCD (Fig. 76) est un piston mobile rs' , qui peut être tiré de bas en haut par un fil assez fort; au sortir du vase ce fil passe sur des poulies, retombe verticalement, et porte à son extrémité un bassin de balance dans lequel on peut mettre des poids. D'abord on établit l'équilibre en chargeant le bassin jusqu'à ce que le piston commence à monter; cette charge est la mesure du frottement. Ensuite, ayant fixé le fil, on le charge des deux côtés; d'une part, en versant de l'eau dans le vase;

do l'autre, en mettant dans le bassin un poids équivalent. Alors, laissant le fil à lui-même, on reconnaît que l'équilibre est établi, et qu'ainsi le piston est pressé ou poussé en bas par le poids de l'eau, autant qu'il est tiré en haut par le poids du bassin, qui est justement égal à celui de l'eau. Il ne faut qu'une goutte de liquide de plus pour le faire descendre, et on pousse de plus pour le faire monter.

Il est évident que chaque portion du fond, quoique chaque centimètre carré, par exemple, porte pour sa part le poids de la colonne liquide, dont il est la base; et que la proposition dont il s'agit n'est pas seulement vraie pour le fond pris dans sa totalité, mais qu'elle est encore vraie pour une quelconque de ses parties.

On peut faire la même expérience avec un vase qui s'élargit (Fig. 78), ou avec un vase qui se rétrécit (Fig. 79) : on trouve toujours que la pression sur le fond est égale au poids de la colonne cylindrique, qui a pour base ce fond lui-même, et pour hauteur sa profondeur au-dessous du niveau. Ainsi, dans le premier cas, la pression du fond est moindre que le poids total du liquide contenu dans le vase, et au contraire elle est plus grande dans le second cas. Ce dernier résultat a toujours quelque chose qui étonne au premier abord; on ne croit pas facilement que le liquide ABCD (Fig. 79) presse le fond du vase autant que le presserait ABRV. Mais, en y réfléchissant, on voit que le liquide qui serait contenu dans les parties latérales CAR et DBV ne pourrait contribuer en rien à presser sur le fond, pas plus qu'il n'y contribuent les parties latérales CAR et DBV dans la Fig. 78.

Il en est de même, quelle que soit la forme du vase; pour avoir la pression sur une partie quelconque du fond, il faut toujours considérer la colonne cylindrique verticale, qui aurait pour base cette partie elle-même, et pour hauteur la hauteur du niveau. On a souvent besoin d'exprimer cette pression d'une manière générale : soit S la portion de surface horizontale que l'on considère, H , la hauteur du niveau au-dessus de cette surface, D , la densité du liquide; la pression sera exprimée par SHD : car SH est le volume de la colonne liquide, et pour avoir le poids, il faut multiplier le volume par la densité.

Ainsi, avec un litre d'eau qui pèse un kilogramme, on peut exercer sur le fond d'un vase une pression très petite, et l'on peut exercer aussi une pression infiniment grande. Pour que la pression soit d'un kilogramme, par exemple, il suffit de prendre un vase cylindrique de base quelconque, la pression totale sera toujours égale au poids du liquide, et par conséquent toujours un kilogramme; seulement la pression sur chaque centimètre carré du fond sera plus petite ou plus grande, suivant que le vase sera plus large ou plus étroit.

Pour que la pression soit de 1/10 de kilogramme, il suffit de prendre un vase dont la base soit par exemple un décimètre carré, et qui soit tellement

évasé, que le litre d'eau n'y prenne que 1/10 de décimètre, ou un centimètre de hauteur.

Pour que la pression soit de 10 kilogrammes, il suffit de prendre un vase dont la base soit par exemple d'un décimètre carré, mais tellement rétréci, que le litre d'eau y prenne une hauteur de 10 décimètres, ou d'un mètre.

Avec le même poids de 1 kilogramme, il serait tout aussi facile d'exercer une pression de 1/100, 1/1000, etc. de kilogramme, ou une pression de 100, 1000, etc., kilogrammes.

Voici un autre appareil au moyen duquel on peut beaucoup plus facilement démontrer cette propriété fondamentale des liquides : il se compose d'un tube horizontal de fer ou de cuivre (Fig. 80), relevé perpendiculairement à ses deux extrémités. D'une part, il se termine par un réservoir de quelques pouces de largeur, sur lequel on peut visser des vases de toutes formes, ayant le même fond; de l'autre part, il se termine par un tube en verre de quelques lignes de diamètre, et sur lequel on peut faire glisser un index. On y verse du mercure, et le point où il s'arrête dans la petite branche est la première position de l'index; ensuite, après avoir vissé sur le réservoir un des vases que l'on veut soumettre à l'expérience, on le remplit d'eau jusqu'à une hauteur connue; la pression qui en résulte fait monter le mercure dans la petite branche, et on note le point où il s'arrête. Un second vase d'une toute autre forme est substitué au premier; on fait sur lui la même expérience, en y versant de l'eau jusqu'à la même hauteur, et l'on voit toujours que dans la petite branche le sommet de la colonne de mercure vient s'arrêter au même point. Donc, quelle que soit la forme des vases, les liquides qu'ils contiennent exercent la même pression sur leurs fonds, quand le niveau est le même. Cet ingénieux appareil est de l'invention de M. de Haldat, professeur de physique et de médecine à Nancy; M. Legendre, élève distingué de l'École normale, avait eu aussi la même idée.

Ce n'est pas seulement sur les fonds des vases que s'exercent les pressions verticales des liquides; elles s'exercent encore sur tous les points de l'intérieur de la masse, et se communiquent de toutes parts en vertu du principe de l'égalité de pression; il en résulte un phénomène fondamental qu'il importe de faire comprendre. Concevons, dans l'intérieur de la masse liquide, une couche mm' (Fig. 81), qui soit parallèle à la surface de niveau NM : toutes les molécules qui composent cette couche sont évidemment pressées par tout ce qui est au-dessus d'elles; elles sont comme si elles supportaient un piston d'un poids égal au poids du cylindre liquide mm' . Seulement, cette pression qu'elle éprouve de haut en bas, se transmet de bas en haut par le principe d'égalité de pression, et chacune de ses molécules n'est en équilibre que par la simultanéité de ces pressions contraires. Ainsi, en ne considérant qu'une portion ab de cette

conche, il faut bien comprendre que la surface a à est à la fois pressée de haut en bas par la colonne liquide dab , et de bas en haut par une force exactement égale; tellement que, si un cylindre solide était plongé dans l'eau, et que sa base vint s'appuyer sur la surface ab , cette pression de bas en haut agirait sur le cylindre et tendrait à le pousser dehors.

Cette conséquence se vérifie par l'expérience suivante: $rv'rv'$ (Fig. 82) est un tube de verre un peu épais, qui est bien dressé à son extrémité inférieure; tt' est un disque de verre dépoli, qui est parfaitement plan, et qu'on appelle un obturateur; il est attaché par un fil qui passe dans le tube, en sorte qu'en tirant le fil l'obturateur vient fermer le tube; on le ferme ainsi et on le plonge dans l'eau. Alors il n'est plus nécessaire de tirer le fil pour empêcher que l'obturateur ne tombe, parce qu'il est repoussé en haut par toute la pression de bas en haut qui s'exerce sur sa surface; et cette pression est égale à celle qu'il supporterait de haut en bas s'il était seul plongé dans l'eau à la même profondeur. Pour en donner la preuve, on verse de l'eau dans le tube: dès que le niveau intérieur approche du niveau extérieur nm' , l'obturateur est poussé de haut en bas, autant qu'il était repoussé de bas en haut, et l'on voit en effet qu'il tombe par son propre poids.

Ainsi, au fond d'un bateau, si l'on faisait une ouverture, l'eau jaillirait à l'instant, et pour l'empêcher d'entrer il faudrait exercer une pression qui fût égale au poids d'une colonne d'eau, ayant pour base l'ouverture, et pour hauteur la profondeur du bateau au-dessous du niveau. C'est pour cela que, dans les grands vaisseaux, la quille doit avoir une grande force pour résister aux pressions de bas en haut qui s'exercent sur le fond du bâtiment. Si ce fond était horizontal, et qu'il eût par exemple 100 mètres carrés de superficie, la pression ne serait pas moindre que cent mille kilogrammes, quand le tirant serait d'un mètre, et que trois cent mille kilogrammes, quand il serait de trois mètres.

Nous pouvons juger par là des énormes pressions qui s'exercent dans les lacs et dans les mers, et de celles qui sont supportées par tous les éléments chimiques qui s'y trouvent, et par tous les corps vivans qui en peuplent les profondeurs. Nous reviendrons sur ce sujet dans le chapitre suivant.

2°. La pression que supporte une paroi latérale est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour hauteur verticale la profondeur du centre de gravité de la paroi au-dessous du niveau, et pour base horizontale une surface égale à la paroi elle-même.

Les pressions latérales se déduisent des pressions horizontales correspondantes au moyen du principe d'égalité de pression: le point m (Fig. 81) faisant partie de la couche horizontale mm' , cette couche lui transmet la pression qu'elle supporte

elle-même; elle la transmet dans tous les sens, et par conséquent le point m la reçoit dans la direction perpendiculaire à la paroi dont il fait partie. Ainsi, chaque étendue d'une paroi latérale éprouve la même pression qu'une égale étendue de la conche horizontale qui lui correspond, c'est-à-dire que SHD représente aussi les pressions latérales: seulement la surface S doit toujours être assez étroite en hauteur pour que la pression soit sensiblement la même dans toute son étendue. Dans une cuve d'eau de 10 mètres de hauteur, la pression sur un centimètre carré de la paroi latérale est donc 100 grammes à 1 mètre de profondeur; elle est de 200 grammes à 2 mètres, et d'un kilogramme à 10 mètres, c'est-à-dire tout-à-fait au fond.

Pour avoir la somme des pressions latérales supportées par une paroi plane, qu'elle soit triangulaire, polygonale, ou de forme quelconque, on voit qu'il suffit de trouver la résultante d'un système de forces qui sont toutes parallèles, mais qui croissent proportionnellement à la profondeur, et aussi proportionnellement à l'étendue horizontale de la portion de paroi que l'on considère. C'est par cette composition de forces qu'on arrive, pour les pressions latérales, au théorème général que nous venons d'énoncer.

63. *Centre de pression.* — Le point d'application de la résultante de toutes les pressions élémentaires est ce qu'on appelle le *centre de pression*; il est toujours placé plus bas que le centre de gravité, puisqu'il coïnciderait avec lui, si les forces n'allaient pas en croissant à mesure que l'on descend. Dans une paroi qui a la forme d'un parallélogramme, le centre de pression est sur la ligne qui divise en deux parties égales les côtés horizontaux, et à $\frac{1}{3}$ de sa hauteur en partant du fond. Dans une paroi triangulaire dont la base est au fond, il est au quart d'une ligne analogue, et au contraire, quand la base est à fleur d'eau, il est à moitié.

64. *Deuxième condition d'équilibre.* — La seconde condition d'équilibre est qu'une molécule quelconque de la masse éprouve dans tous les sens deux pressions égales et contraires. Il est évident que cette condition est nécessaire, et il n'est pas moins évident qu'elle est suffisante pour l'équilibre de l'intérieur, comme la première est suffisante pour l'équilibre de la surface. Essayons de donner un exemple qui en fasse mieux comprendre la nécessité. Supposons que dans le vase ABCD (Fig. 83), on eût arrangé, pour un moment, de l'eau et du mercure de telle sorte que les surfaces Dm et mC fussent bien nivelées; et que la surface de jonction des deux liquides fût Lm. La première condition d'équilibre serait remplie, et cependant l'équilibre n'aurait pas lieu; car au point a , par exemple, les pressions latérales et opposées ne seraient pas égales; celle du mercure étant la plus forte, les molécules de ce liquide tomberaient au fond et s'y mètreraient de niveau. En général, divers liquides étant mêlés dans le même vase, ils

s'arrangeront nécessairement de telle sorte, que chacun d'eux ait sa surface horizontale; c'est le seul arrangement qui puisse remplir la seconde condition d'équilibre. Ensuite il y aura stabilité, si les plus lourds sont en bas, suivant l'ordre de leur densité; mais s'ils n'y sont pas, on n'aura qu'un équilibre instable; au moindre choc les surfaces de jonction cesseroient d'être planes, elles deviendront ondulées; les pressions ne seront plus égales dans tous les sens, et les liquides plus légers seront poussés en haut, tandis que les plus lourds viendront prendre la place qui convient à leur densité. C'est pour cela que de l'huile, battue avec de l'eau, s'en sépare avec le temps, et vient à la surface où l'appelle sa densité; et le même phénomène se reproduit dans tous les mélanges de liquides différents, lorsqu'il n'y a pas une affinité chimique qui combine entre eux tous les éléments, et qui leur donne une densité commune.

65. *Vases communiquans.* — Lorsque plusieurs vases communiquent entre eux, quels que soient leur nombre et leur forme, les liquides qu'ils contiennent sont, pour l'équilibre, soumis aux deux conditions que nous venons d'établir. Ainsi, quand c'est le même liquide qui remplit tous les vases, il faut, par la première condition, que toutes les surfaces soient de niveau, et par la seconde, qu'elles soient de même niveau; car sans cela les couches de niveau de l'intérieur de la masse ne seraient pas également pressées dans toute leur étendue. En effet, dans le vase (Fig. 84), si le niveau de la grande branche était par exemple en *ab*, au lieu d'être en *NN'*, sur la même ligne que *aa'*, la couche de niveau *CC'* *cc'* ne serait pas également pressée en *CC'* et en *cc'*, et l'équilibre n'aurait pas lieu, puisque une couche de niveau quelconque doit toujours être également pressée dans toute son étendue.

Quand les liquides sont différents, il faut que les surfaces aient des niveaux différents.

Dans le vase représenté figure 85, il y a de l'eau dans la grande branche et du mercure dans la petite; les liquides se touchent en *g*, et on mène l'horizontale *gh*. Si les sections *g* et *h* n'avaient rien au-dessus d'elles, l'équilibre aurait lieu; ainsi, pour l'équilibre, il faut que sur chaque point de leur étendue elles soient également pressées, l'une par l'eau, et l'autre par le mercure. Or une portion *S* de la section *hg* supporte une pression *S HD*, en désignant par *H* la hauteur de l'eau au-dessus de *g*, et par *D* sa densité; de même, une égale portion de la section *h* supporte *S D' H'*, *H'* étant la hauteur du mercure au-dessus de *h*, et *D'* sa densité. Il faut

$$\begin{matrix} H & D \\ \times & S \end{matrix}$$
 donc que l'en ait $S \times HD = S \times H' D'$, ou — — — ;

c'est-à-dire que les hauteurs au-dessus du point de jonction des liquides sont entre elles en raison inverse des densités : ainsi, un ponce de mercure fait équilibre à peu près à 14 pouces d'eau. La jonction des surfaces pourrait bien ne pas se faire sur

une ligne horizontale, comme, par exemple, si on versait asses d'eau dans le vase pour refouler la colonne de mercure jusqu'en *a* ; mais alors on conçoit que dans cette section, si les pressions latérales sont égales, de chaque côté, sur les molécules qui sont au centre et dans l'axe du tube, elles ne peuvent plus l'être pour les molécules qui sont au-dessus ou au-dessous. Au bord supérieur en *a*, la pression de l'eau l'emporte, et au contraire au bord inférieur en *s*, c'est la pression du mercure ; la surface de jonction tend à prendre la figure *s' s'*, et l'eau finit par passer dans la petite branche, et le mercure dans la grande, jusqu'à ce qu'enfin il s'établisse un autre équilibre.

Dans les tubes qui ont moins d'une ligne d'ouverture, cet effet ne se produit pas; les colonnes sont trop étroites pour se *déformer*, la cohésion des molécules de chaque liquide suffit pour résister à l'inégalité de pression qui existe entre le bord supérieur et le bord inférieur.

66. *Du niveau des mers.* — Les principes de l'hydrostatique ne trouvent pas seulement leur application dans les tubes et dans les vases étroits, sur lesquels nous pouvons expérimenter; mais ils s'appliquent pareillement à tous les liquides qui sont répandus dans la nature.

C'est par les lois précédentes, que toutes les eaux de la terre sont nivelées dans les bassins profonds de la mer, et que leur vaste surface conserve tout autour du globe une forme permanente; si elle est soulevée par les tempêtes, elle est ramenée par l'équilibre dans les limites qui lui sont assignées.

Si la terre était immobile et formée de couches homogènes, nous avons vu que la surface des mers serait rigoureusement sphérique; les navigateurs qui passent sous la ligne, ceux qui parcourent des plages inconnues, dans l'un ou dans l'autre hémisphère, et ceux qui visitent les côtes du Groënland, ou les mers encore plus voisines du pôle, se trouveraient tous en même temps à la même distance du centre de la terre; les choses seraient ainsi par les lois de l'hydrostatique, et par la structure des parties solides du globe, qui n'offrent à la surface que des saillies insensibles. De grandes inégalités dans les parties solides troubleraient la sphéricité des surfaces liquides : si la chaîne des Cordillères était seulement cent fois plus haute, les eaux seraient montées sur les côtes de l'Amérique, vers l'Orient comme vers l'Occident; elles seraient descendantes sur les côtes opposées, et les ports de France seraient à sec, aussi bien que ceux du Japon.

Si la terre était immobile, et composée à l'extérieur de parties hétérogènes d'une densité très inégale; si, par exemple, au-dessous de l'Océan, entre la éroûte qui lui sert de fond et le centre de la terre, il se trouvait d'immenses cavernes qui fussent vides ou remplies de substances de faible densité, il est clair que l'intensité de la pesanteur se-

rait beaucoup moindre sur les eaux de l'Océan que sur celles des autres mers, et qu'alors la surface générale des eaux, au lieu d'être sphérique de toutes parts, devrait être renflée dans quelques endroits, et dans d'autres déprimée. Ainsi, une hétérogénéité de substances pourrait à elle seule produire des irrégularités de forme, et si à cette cause on ajoute l'influence de la force centrifuge, on voit que la question devient encore plus compliquée. Dans l'ignorance où nous sommes sur la composition intérieure du globe, dont, avec toute notre puissance, nous ne pouvons fouiller qu'une superficie d'une profondeur insensible, les seuls moyens que nous ayons de trouver la véritable forme de la surface des mers sont les opérations géodésiques et les observations du pendule. Par le premier moyen nous arriverons à la connaissance du fait, indépendamment de toute hypothèse et de toute explication; et par le second moyen, nous arriverons peut-être à découvrir quelques lois générales de la structure intérieure de la terre, ou du moins quelques-unes des causes locales qui peuvent altérer la régularité de sa surface. L'équilibre des eaux dépend de la direction de la pesanteur, et les oscillations du pendule dépendent de l'intensité de la même force; il est difficile de démêler d'*a priori* jusqu'à quel point ces deux éléments sont liés entre eux, et jusqu'à quel point ils peuvent se déterminer l'un par l'autre; et c'est ce qui donne encore plus d'importance aux recherches qui ont pour objet de les déterminer avec exactitude.

Presque tous les bassins des mers communiquent de diverses manières, soit par de larges chaux, soit par des détroits plus ou moins resserrés; et les eaux dans ces différens bassins sont soumises aux conditions d'équilibre des vases communicans. Seulement, il faut observer que l'eau de la mer n'est point un liquide homogène dans toute l'étendue de sa masse, la température change avec la latitude, et elle change aussi avec la profondeur; le degré de salure change pareillement; toutes ces causes font varier la densité dans les différens lieux, et de là il résulte une foule de mouvemens par lesquels l'équilibre tend à s'établir. L'eau de l'Océan afflue dans la mer Méditerranée par le détroit de Gibraltar; un courant rapide en est la preuve: mais on ne sait pas si par un courant contraire, qui aurait lieu à une plus grande profondeur, l'eau de la Méditerranée ne passe pas dans l'Océan. Si ce second courant existe, ils sont sans doute produits l'un et l'autre par la différence de densité des couches; s'il n'existe pas, il faut supposer que la Méditerranée perd par l'évaporation, ou par d'autres causes, plus d'eau qu'elle n'en reçoit par le Nil, le Rhône, le Danube, et tous les fleuves qui s'y jettent, et que l'Océan vient compenser cette perte pour la tenir à la hauteur voulue pour l'équilibre.

Voici les résultats qui ont été obtenus jusqu'à présent, sur le nivellement des mers. Pendant l'ex-

pédition d'Égypte, une commission d'ingénieurs, sous la direction de M. Le Père, a déterminé les hauteurs relatives de la mer Rouge et de la mer Méditerranée. Cette opération mérite une assez grande confiance; et, pour résultat, elle donne une différence de niveau très remarquable entre ces deux mers, qui sont si voisines près de l'isthme de Sues et qui d'ailleurs communiquent par l'Océan. Aux mers basses la mer Rouge est encore élevée de 8^m, 12 au-dessus de la mer Méditerranée, et dans les hautes mers son excès de hauteur s'élève à 9^m, 9. Ainsi se trouve confirmée l'opinion des anciens sur les dangers d'ouvrir une communication entre les deux mers. Aujourd'hui, une grande partie du sol de l'Égypte serait encore submergée par la mer Rouge, et cependant le lit du Nil et le sol de l'Égypte s'élèvent sans cesse par le dépôt de limon que laisse chaque inondation. M. Girard a fait de très curieuses recherches sur ce sujet: en prenant la hauteur actuelle des crues, aux nilomètres d'Éléphantine et de l'île de Rondah, et en la comparant à ce qu'elle était autrefois, il trouve la mesure de l'exhaussement du sol, et il l'évalue à 126 millimètres par siècle. A ce compte, il faudrait encore bien des siècles pour que la Basse-Égypte fut seulement au niveau de la mer Rouge.

Dans l'opération de la méridienne de France, M. Delambre a calculé la hauteur de Rhodes au-dessus du niveau de la mer Méditerranée à Barcelonne, et sa hauteur au-dessus du niveau de l'Océan, qui baigne le pied de la tour de Dunkerque; ces deux hauteurs sont égales entre elles à une fraction de mètres près, d'où il suit que, s'il existe quelque différence de niveau entre la mer Méditerranée à Barcelonne, et l'Océan à Dunkerque, cette différence est du moins très petite.

M. de Humboldt, dans son voyage en Amérique, a fait sur les côtes de l'Océan Atlantique et sur les côtes de la mer du Sud, des observations du baromètre, d'où l'on peut tirer quelque connaissance sur la hauteur relative de ces deux mers. Des moyennes barométriques prises d'une part à Carthagène, à Comana et à Vera-Cruz, sur la côte orientale du Mexique; et d'une autre part, au Callao et Acapulco, sur les bords de la mer du Sud, il résulterait que la mer du Sud serait plus élevée que l'Océan d'environ 7 mètres. D'autres observations de M. de Humboldt donneraient une différence un peu plus grande; mais ce célèbre voyageur ou donne les résultats précédens que comme une première approximation, supposant que les inégales hauteurs des marées, les heures différentes des établissemens des ports, et l'étendue plus ou moins grande des variations horaires du baromètre, sont autant de causes qui peuvent avoir une influence dans des mesures aussi délicates.

Le niveau de la mer Caspienne a été l'objet de plusieurs recherches récentes. Il a été déterminé, en 1816, par MM. d'Engelhardt et Parrot, dans

leur curieux voyage au Caucase et en Crimée; il l'a été, en 1818, par M. Pansner; et vers cette même époque, M. Wisniewski a publié, dans les *Mémoires de Pétersbourg*, la série des observations qu'il avait faites dans le même but dès l'année 1812. Toutes ces mesures s'accordent à placer le niveau de la mer Caspienne de beaucoup au-dessous du niveau de la mer Noire : d'après le résultat moyen, on peut estimer cette différence à 100 mètres ou à environ 300 pieds. Cependant près des bords de la mer Caspienne, et jusqu'à une grande distance de ses rivages actuels, on retrouve des preuves frappantes du séjour des eaux salées. La nature du sol, sa forme et sa composition chimique, les débris de coquilles et les squelettes de poissons dont il est rempli, ne semblent laisser aucun doute que la mer autrefois n'ait couvert toutes ces steppes, à plusieurs centaines de lieues de distance. Comment s'est produite la dépression de niveau que l'on observe aujourd'hui? Qu'est devenue cette masse d'eau qui manque et que l'on peut estimer à un volume de 30,000 lieues carrées de superficie sur une centaine de mètres de hauteur? Voilà des problèmes dont on cherchera long-temps encore la solution; car ils tiennent à la géologie générale, et peut-être aux grandes catastrophes dont le Caucase a été le théâtre.

67. Le mélange des eaux des fleuves avec les eaux de la mer présente aussi quelques phénomènes d'hydrostatique qu'il est assez curieux d'observer. L'eau douce étant plus légère, doit se tenir à la surface, tandis que l'eau salée doit, par sa pesanteur, former les couches les plus profondes. C'est, en effet, ce que M. Stevenson a observé en 1816 dans le port d'Aberdeen, à l'embouchure de la Dee, et aussi de la Tamise, près de Londres et de Wolwich. En puisant de l'eau à diverses profondeurs avec un instrument imaginé pour cet objet, M. Stevenson a trouvé qu'à une certaine distance de l'embouchure, l'eau est douce dans toute la profondeur, même à la marée montante; mais que si l'on descend le cours de la rivière et que l'on approche un peu plus près de la mer, on trouve l'eau douce à la surface, tandis que l'eau de la mer forme les couches du fond. D'après ses observations, c'est entre Londres et Wolwich que pour la Tamise la salure du fond commence à être sensible. Ainsi,

au-dessous de Wolwich, cette rivière, au lieu de couler sur un fond solide, coule véritablement sur le fond liquide formé par les eaux de la mer, avec lesquelles sans doute elle se mêle plus ou moins. Cependant M. Stevenson est d'opinion qu'à la marée montante les eaux douces sont soulevées pour ainsi dire *tout d'une pièce* par les eaux salées qui affluent et qui remontent le lit du fleuve, tandis que l'eau douce continue de couler vers la mer.

Ces expériences tendent à confirmer l'opinion que Franklin avait émise sur ce sujet, dès l'année 1761. « Si quelques rivières, dit-il, se rendent dans des lacs, sans que cependant ceux-ci débordent jamais, c'est que les eaux se répandent alors sous une surface tellement grande, que l'évaporation enlève journellement une masse de liquide à peu près égale à celle qui afflue; mais il est des fleuves qui, par l'étendue de leur cours et la largeur de leur embouchure, peuvent être assimilés à des lacs. » Pour que la ressemblance fût parfaite, il suffirait qu'une digue arrêtât le cours des eaux et les empêchât de se rendre à la mer : on trouverait bien alors, suivant les saisons, quelques différences de niveau; mais on conçoit en général que, sous certaines circonstances, ces différences pourraient être renfermées dans des limites assez resserrées. Quoique la communication entre la rivière et la mer soit ouverte, on peut supposer que la digue dont nous venons de parler existe réellement dans la surface de jonction de l'eau douce et de l'eau salée. Seulement cette digue sera mobile; elle remontera d'un certain nombre de lieues à la marée montante, et redescendra ensuite : l'amplitude des excursions pourra varier avec le volume des eaux. Dans quelques cas, on devra aussi s'attendre à trouver que l'eau de la mer et celle de la rivière se mêlent en se rencontrant, et dans une étendue plus ou moins considérable, par le double effet de leurs mouvemens et de la différence des pesanteurs spécifiques; mais, à une certaine distance de l'embouchure, l'eau douce, d'abord entraînée par le courant et refoulée ensuite par la marée, oscillera à peu près dans les mêmes limites et sans jamais atteindre la mer. L'ignorant imaginerait que les eaux coulent et se perdent en partie sous quelques crevasses de la terre, tandis qu'en réalité c'est par l'air qu'elles s'échappent.

CHAPITRE VI.

DE L'ÉQUILIBRE DES GAZ ET DES PRESSIONS ATMOSPHÉRIQUES.

68. L'air est un corps qui ne tombe pas immédiatement sous nos sens comme les corps solides ou les liquides; mais il se manifeste à nous par tant

de phénomènes sur la terre et sur les eaux, qu'il n'est pas nécessaire de chercher d'autres preuves de son existence. Il y a des orages dans tous les

climats et des tempêtes sur toutes les mers : ainsi le fluide de l'air enveloppe toute la surface du globe. Il forme partout une couche d'une grande épaisseur ; car dans tous les pays, sur les montagnes comme dans les plaines, on voit flotter des nuages qui sont emportés par le vent, et au-dessus de ces nuages on voit la couleur brillante du ciel, qui est une preuve de la profondeur de l'air, comme la couleur de l'Océan est une preuve de la profondeur de l'eau. S'il n'y avait pas d'air, le ciel serait sans éclat et sans couleur ; il paraîtrait comme une voûte absolument noire, où l'on verrait les astres briller pendant le jour avec le même éclat que pendant la nuit. Cette grande masse d'air, qui est répandue tout autour de la terre, et dont les couches superposées s'élèvent plus haut que les plus hautes montagnes, est ce que l'on nomme l'*atmosphère*. Le sommet le plus élevé de l'Himalaya ne s'élève pas à deux lieues au-dessus du niveau de la mer, et nous verrons que l'atmosphère s'élève à plus de douze à quinze lieues.

Les découvertes chimiques du dernier siècle nous ont fait connaître plusieurs corps, qui sont différens de l'air par leur nature, mais qui sont analogues à l'air par leur transparence, par leur fluidité et par l'ensemble de leurs propriétés physiques. Tous ces corps ont reçu différens noms : d'abord on les appela des *airs*, et l'on disait alors : *air méphitique*, *air inflammable*, *air hépatique*, *air fixe*, *air phlogistique*, *déphlogistique*, etc. ; aujourd'hui tous ces corps sont ce que l'on appelle les *gaz* ou les *corps gazeux* ou les *fluides élastiques*.

60. Les gaz sont soumis à deux espèces de forces, comme les solides et les liquides ; savoir : à la force de la pesanteur et aux forces moléculaires.

70. La pesanteur de l'air, qui avait été soupçonnée autrefois, même avant Aristote, n'a été véritablement démontrée qu'en 1640 par Galilée, et un peu plus tard elle a été confirmée par les belles expériences de Torricelli et par les expériences encore plus frappantes de Pascal. Cette vérité fondamentale peut se démontrer directement par l'expérience suivante : on fait le vide dans un grand ballon, au moyen de la machine pneumatique ; on le suspend à l'un des bras de la balance, et de l'autre côté on met des poids pour établir l'équilibre. Si après cela on ouvre un instant le robinet pour laisser rentrer un peu d'air, l'équilibre est rompu, la balance penche du côté du ballon, et il faut ajouter des poids dans l'autre bassin ; si l'on rouvre le robinet encore pendant un instant, il arrive encore une augmentation de poids ; et enfin, si on laisse rentrer l'air complètement, on trouve que pour rétablir l'équilibre il a fallu ajouter dans l'autre bassin une somme de poids très sensible. Pour un ballon de 10 litres la différence des poids est de plus de 10 grammes ; ce qui prouve déjà, par une première approximation, que 1 litre d'air dans les circonstances ordinaires pèse un peu plus de 1 gramme, c'est-à-dire que l'eau n'est pas

millio fois plus pesante que l'air ordinaire à Paris.

71. Les forces moléculaires agissent dans les gaz tout autrement que dans les solides et dans les liquides. Nous avons vu que ces forces retiennent les molécules des solides fortement pressées les unes sur les autres, et fixement arrêtées à leur place ; qu'elles retiennent aussi les molécules des liquides, tout en leur laissant une grande liberté de se mouvoir dans tous les sens ; mais dans les gaz les forces moléculaires sont répulsives, et toutes les molécules, cédant à l'action de ces forces, tendent sans cesse à s'éloigner les unes des autres, et s'éloignent en effet jusqu'à ce qu'elles rencontrent des obstacles qui les arrêtent. Ainsi, l'air qui est renfermé dans un vase, fait sans cesse un effort contre les parois pour les presser et les repousser plus loin, et il faut toujours ou que les parois éclatent sous cette pression, ou qu'elles soient assez fortes pour y résister. Cette conséquence semblerait d'abord impossible, car s'il est vrai que, dans un vase fermé, l'air fasse un tel effort contre les parois, il semble nécessaire que cet air s'échappe par la moindre ouverture, et qu'il s'échappe à plus forte raison à l'instant où l'on ouvre le vase, ou même avant que l'on ait eu le temps de le fermer. D'où il s'ensuivrait que tous les vases sent vides d'air, tandis que l'on sait bien qu'ils en sent tous remplis, à moins que l'on n'y verse de l'eau ou quelque autre liquide. Pour lever cette difficulté, imaginons un vase de 1 litre de capacité, par exemple, et fermé de toutes parts : s'il était vide et que l'on y fit une ouverture, l'air extérieur se précipiterait à l'instant pour le remplir ; au contraire, s'il était plein, que l'on en percât les parois et qu'il n'y eût pas d'air au dehors, l'air intérieur sortirait à l'instant ; mais quand il y a de l'air au dehors comme au dedans, l'air extérieur fait pour entrer dans le vase autant d'effort que l'air intérieur pour en sortir, et, entre ces deux pressions égales, l'équilibre subsiste aux points où le vase est ouvert, comme aux points où il est fermé par des parois. C'est donc l'air extérieur qui arrête la force répulsive de l'air intérieur.

Cette propriété est si remarquable qu'il est bien de la démontrer par une expérience directe. Sous le récipient de la machine pneumatique on met une vessie à moitié pleine d'air, en donne quelques coups de piston, et on voit la vessie qui se gonfle de plus en plus jusqu'à prendre tout le volume dont elle est susceptible ; elle se tend comme si on y soufflait de l'air avec une grande force. On voit donc que l'air intérieur qu'elle contient faisait un effort pour repousser les parois, puisqu'il les repousse en effet, dès que, par le jeu de la machine, on enlève l'air du récipient qui arrêta cet effort. Au lieu d'une vessie on pourrait mettre sous le récipient un vase de verre très mince, fermé par un bouchon ; alors en faisant le vide comme tout à l'heure, on verrait sauter le bouchon ou bien peut-être le vase se briserait. Cette pression, que l'air

exerce contre les parois des vases qui le contiennent, est ce que l'on nomme son *élasticité* ou sa *force élastique*, ou sa *tension*.

Un ressort ne devient élastique que quand on le comprime, et il perd sa tension dès qu'il est revenu à son état primitif; mais l'air est toujours dans un état actuel de tension; il n'y a point pour lui de volume primitif, puisqu'il tend sans cesse à occuper un volume plus grand. Un litre d'air ordinaire serait versé dans un espace vide, de plusieurs milliers de mètres cubes de capacité, qu'il se répandrait partout dans cet espace, et qu'il en presserait les parois dans tous les sens, faisant encore un effort pour se répandre plus au large. On conçoit d'après cela combien il importe d'étudier les effets de l'air atmosphérique, car sa seule présence est une force active dans tous les phénomènes que nous observons.

72. Conditions d'équilibre de l'air. — Il n'y a pour les gaz qu'une seule condition d'équilibre; savoir, que leur force élastique soit la même dans toute l'étendue d'une couche de niveau. Cette condition est analogue à la seconde condition d'équilibre des liquides (64), et elle se déduit des mêmes principes : savoir, de la mobilité des molécules et de l'action de la pesanteur qui s'exerce sur elles. Dans un vase quelconque (Fig. 86) tous les points de la couche horizontale *cc'* doivent avoir la même élasticité, car il faut que la force répulsive des molécules qui sont en *b*, puisse arrêter la force répulsive des molécules qui sont en *b'*; et ces forces ne peuvent s'arrêter et se faire équilibre, à moins qu'elles ne soient égales dans tous les points de la couche horizontale *cc'*. Il en est de même dans toutes les sections de niveau que l'on peut concevoir, soit au-dessus, soit au-dessous de *cc'*; mais il est évident que la couche *mm'*, par exemple, est plus pressée que *cc'*, puisqu'elle supporte d'abord toute la pression qui s'exerce en *cc'*, et qui lui est transmise par le principe d'égalité de pression; et qu'en outre elle supporte encore tout le poids de l'air qui est compris dans la colonne *cmm'e'* et qui pèse librement sur elle comme une colonne d'eau pèse sur le fond d'un vase.

Les conditions de la stabilité et de l'instabilité de l'équilibre sont aussi les mêmes que dans les liquides, et pour les mêmes raisons; l'équilibre est stable quand la densité de l'air inférieur est plus grande que celle de l'air supérieur, et il est instable quand le contraire a lieu. Mais l'équilibre instable, quoique mathématiquement possible, est toujours physiquement impossible, à cause de la grande mobilité des molécules des gaz.

Cette loi de l'équilibre de l'air est une loi universelle pour toutes les masses gazeuses, quelque petites ou quelque grandes qu'elles puissent être. Elle s'applique à l'air contenu dans un grand édifice comme à celui qui est contenu dans un vase de petites dimensions; elle s'applique à toute la colonne d'air atmosphérique qui repose sur une vaste plaine,

et elle s'applique enfin à la masse entière de l'air qui constitue l'atmosphère. Que l'on conçoive à une hauteur quelconque, à la hauteur du Mont-Blanc, par exemple, une couche atmosphérique qui enveloppe la terre, et qui soit parallèle à la surface des eaux, il faudra pour l'équilibre que tous les points de cette couche supportent partout la même pression, à Paris comme aux antipodes, sur les continents comme sur les mers, et dans les régions des pôles comme dans celles de l'équateur. Une seconde couche parallèle à celle-là, mais qui serait à cent mètres au-dessous, devrait, par la même raison, avoir tous ses points également pressés entre eux, et tous se trouveraient plus pressés que ceux de la première couche, du poids entier de la colonne d'air de cent mètres qu'ils supportent de plus. Ainsi, à hauteur égale, la pression doit être égale, mais elle diminue à mesure que l'on s'élève. La nécessité d'une pression uniforme dans une si grande étendue fait assez comprendre que dans l'océan de l'air tout équilibre est impossible. Un calme universel est incompatible avec tout de mobilité, puisqu'un seul point ébranlé met toute la masse en agitation.

Les gaz ne peuvent pas, comme les liquides, avoir une surface libre sur laquelle aucune pression ne soit exercée; car nous avons dit qu'il faut un obstacle pour arrêter leur force expansive, qui est indéfinie. D'après cela, on pourrait conclure que l'atmosphère n'est pas bornée à deux ou quinze lieues, comme on le dit communément, puisqu'à cette limite les molécules de l'air, toujours poussées par leur force élastique, et ne trouvant rien qui les arrête, se précipiteraient dans le vide et se dissiperaient de plus en plus, jusqu'à remplir enfin toute l'immense étendue des cieux. Ainsi l'air serait partout; il envelopperait la lune comme la terre, il envelopperait le soleil et les planètes; et il formerait autour de ces astres des atmosphères analogues à l'atmosphère terrestre. Nous démontrerons en optique que les phénomènes observés ne justifient point ces conclusions; et sans expliquer à présent les causes probables qui retiennent les molécules de l'air, nous adopterons l'opinion que notre atmosphère est limitée et qu'elle n'a en effet que deux ou quinze lieues d'étendue. Au-delà est le vide; la dernière couche de l'atmosphère est la dernière limite de la masse pondérable de la terre.

73. De la pression de l'air. — Les conditions générales de l'équilibre étant une fois posées, nous pouvons constater, par des expériences directes, que toutes les couches inférieures de l'air sont en effet pressées par les couches supérieures, et qu'elles le sont diversement suivant la hauteur à laquelle on s'élève au-dessus du niveau de la mer.

Expériences du crève-ventre. — On met sur la platine de la machine pneumatique une espèce de manchon de verre (Fig. 87), dont les parois sont très épaisses, et qui est fermé à sa partie supé-

rière par une membrane de vessie, très bien tendue et fortement arrêtée sur ses bords. Cette membrane éprouve, d'une part, la pression de l'air extérieur qui tend à l'abaisser, et de l'autre, la pression de l'air intérieur qui tend à la soulever, de telle sorte qu'elle resta en équilibre entre ces deux pressions opposées. Si par quelque moyen on soufflait dans le vase une nouvelle quantité d'air, la pression intérieure deviendrait la plus forte, et la membrane se renflerait en dehors; au contraire, si on enlève de l'air, la pression intérieure deviendra plus faible, et la membrane, cédant à la pression extérieure, devra fléchir et s'enfoncer en dedans. C'est là l'effet qu'on obtient en faisant jouer la machine pneumatique, car elle aspire peu à peu tout l'air qui est contenu dans le vase : dès les premiers coups de piston, on voit la membrane fléchir sous la pression extérieure, puis elle fléchit de plus en plus; enfin quand le vide est fait, on voit qu'elle est très tendue, et par conséquent très pressée. On peut juger qu'un poids de 100 kilogrammes, qui serait posé sur elle, lui donnerait moins de tension. Alors, si l'on donne avec le doigt un coup, même très léger, au milieu de la membrane, elle éclate en mille pièces, et l'on entend une explosion plus forte qu'un coup de pistolet, tant est grande la pression de l'air extérieur, et l'effort qu'il fait pour rentrer dans le vase; car c'est en rentrant avec impétuosité qu'il produit tant de bruit.

Au lieu d'une pression de haut en bas, on aurait une pression latérale, si le crève-vessie était incliné, ou une pression de bas en haut, s'il était renversé; toutes ces pressions ne produiraient pas moins d'effet que la première, ce qui prouve bien que l'air presse dans tous les sens, ou que les pressions se transmettent et deviennent aussi des pressions de bas en haut, comme il arrive dans les liquides.

Cette expérience semble d'abord très étonnante; on ne comprend pas comment l'air d'un appartement peut exercer une pression si prodigieuse. Il faudrait qu'il fût bien pesant s'il n'agissait que par sa pesanteur, car une colonne d'eau qui aurait toute la hauteur de l'appartement serait bien loin de produire un tel effet. C'est qu'aussi il y a une autre cause. Supposons, pour un moment, que l'expérience ait été faite en plein air; alors, d'après les principes de l'hydrostatique, la pression serait égale au poids de la colonne d'air, ayant pour base la largeur de la membrane, et pour hauteur, non pas un mètre, ni dix mètres, ni cent mètres, mais toute la hauteur de l'atmosphère; dix lieues si l'atmosphère a dix lieues, cent lieues si l'atmosphère en a cent. Puisque sur une même couche de niveau les pressions sont toujours égales, on voit que dans un appartement la pression qui s'exerce sur le crève-vessie est aussi toute la pression atmosphérique.

En mesurant cette pression, qui fait éclater

avec tant de bruit la membrane du crève-vessie, on aurait tout le poids d'une colonne d'air qui s'élève aussi haut que l'atmosphère peut s'étendre. De même qu'un physicien pourrait, au fond de la mer, avec un appareil semblable, trouver le poids total de la colonne d'eau qui s'élèverait au-dessus de sa tête.

74. *Mesure de la pression atmosphérique.* — Puisque l'atmosphère enveloppe la terre, elle en presse tous les points, comme elle presse la membrane du crève-vessie; elle presse également toute la surface des continents et toute la surface des eaux, soit dans l'immense étendue des mers, soit dans les lacs, soit dans les vases qui servent à nos expériences.

Supposons qu'un tube plonge par une de ses extrémités dans un vase rempli d'eau (Fig. 88) : le liquide se met au même niveau dans le tube et dans le vase, parce que la pression atmosphérique est la même, dans l'intérieur du tube en nn' , et au dehors sur la surface NN' . Mais si on aspire une partie de l'air contenu dans la tube, le liquide monte comme s'il était lui-même aspiré; il monte de plus en plus à mesure que l'aspiration continue, il s'arrête quand elle cesse, et la colonne soulevée reste suspendue dans l'intérieur du tube. Cette expérience, qui n'est qu'un jeu d'enfant, va nous donner le moyen de mesurer la pression atmosphérique, et de trouver le poids total de l'air, comme si nous pouvions mettre toute l'atmosphère dans une balance. En aspirant l'air, on diminue la pression qui s'exerce à l'intérieur du tube, sans rien changer à la pression extérieure : celle-ci étant alors la plus forte, elle force le liquide à monter, jusqu'à ce que la condition d'équilibre soit remplie, c'est-à-dire jusqu'à ce que la pression soit la même sur toute la couche de niveau, aussi bien à l'intérieur en nn' qu'à l'extérieur en NN' . Au moment où ces pressions sont égales le liquide cesse de monter; mais la pression intérieure qui s'exerce sur nn' se compose de deux parties : de la pression due au poids de la colonne soulevée, et de la pression due à l'élasticité de l'air qui reste au-dessus du sommet de cette colonne. Ainsi, en diminuant de plus en plus l'élasticité de l'air, l'eau intérieure doit s'élever de plus en plus, et enfin, si l'on épuise l'air complètement, il faudra qu'elle s'élève à tel point qu'à elle seule elle presse sur nn' autant que l'atmosphère presse au dehors sur NN' ; il faudra donc que le poids de cette colonne d'eau soit égal au poids d'une colonne d'air de même base, ayant pour hauteur toute la hauteur de l'atmosphère; car, sur chaque centimètre carré de surface, l'air et l'eau ne pressent que par leur poids. Voilà donc le moyen de peser une colonne atmosphérique, quelle que soit la hauteur à laquelle elle puisse s'élever; tout se réduit à trouver un tube assez long, et à épuiser l'air assez complètement. Pascal en fit l'expérience à

Rouen, en 1646; son tube avait 46 pieds de long, et pour s'éviter la peine d'en épuiser l'air pen à peu, ce qui aurait été impossible en ce temps-là, il le fit sceller à un bout, le remplit de vin, et ferma l'autre bout avec un bouchon. Alors, par le moyen de cordes et de poulies, le tube fut redressé verticalement, et l'extrémité inférieure fut plongée dans un vase d'eau; au moment où l'on enleva le bouchon qui la fermait, toute la colonne liquide s'abaissa dans le tube jusqu'à ce que son sommet fût à environ 32 pieds au-dessus du niveau de l'eau du vase. Dans les 14 pieds qui étaient au-dessus, il n'y avait point d'air, c'était le vide; ainsi, la colonne liquide faisait à elle seule équilibre à la pression atmosphérique; d'où il suit qu'une colonne d'eau en de vin de 32 pieds de hauteur pèse autant qu'une colonne d'air de même base. Ainsi, chaque point de la surface de la terre est pressé comme s'il était recouvert d'une couche d'eau de 32 pieds de hauteur; et nous, qui vivons au fond de l'océan de l'air, nous sommes pressés de toutes parts comme si nous étions au fond d'un lac, avec 32 pieds d'eau au-dessus de nos têtes.

C'est à des fontainiers de Florence que nous devons le premier germe de cette découverte. Ayant eu l'occasion de faire un corps de pompe qui avait plus de 32 pieds de hauteur, ils virent, avec grande surprise, que l'eau ne voulait pas monter jusqu'à son sommet. A cette époque, en expliquait l'ascension des liquides, en disant que la nature avait horreur du vide, et qu'elle y poussait les liquides pour le remplir. Les explications par les causes occultes n'étaient pas de celles dont Galilée pût se contenter; aussi, dès qu'il eut connaissance du fait observé par les fontainiers, il supposa que la pesanteur de l'air en était la véritable cause. Toricelli, son disciple, en donna la preuve la plus décisive; voici à peu près son raisonnement : pour exercer des pressions égales, les colonnes liquides doivent avoir des hauteurs qui soient en raison inverse de leur densité; donc, un liquide qui pèserait une fois plus que l'eau, ferait équilibre à l'atmosphère avec une colonne de 16 pieds, et le mercure, qui pèse à peu près quatorze fois plus que l'eau, doit faire équilibre avec une colonne qui est la quatorzième partie de 32 pieds, ou environ 28 pouces. C'est une conséquence facile à vérifier : on prend un tube de verre d'une trentaine de pouces, fermé par un bout; on le remplit de mercure, et ensuite, après l'avoir bouché avec le doigt, on le retourne verticalement pour en plonger l'extrémité dans une cuvette remplie de même liquide (Fig. 90). Aussitôt qu'on enlève le doigt, la colonne intérieure descend de quelques pouces, puis elle s'arrête; l'équilibre est établi, et le petit fillet de mercure qui reste suspendu dans le tube est une balance qui donne le poids de l'atmosphère. Cet appareil est le *baromètre*, la ce-

lenne d'eau de Pascal était un véritable baromètre à eau. Le vide qui est au-dessus de la colonne barométrique s'appelle le *vide barométrique* ou le *vide de Toricelli*.

Nous pouvons à présent mettre une grande exactitude dans nos résultats. La hauteur du baromètre est la hauteur verticale du sommet *as'* (Fig. 90), au-dessus du niveau *NN'*; elle n'est pas la même dans tous les lieux, mais sur les bords de la mer elle est ordinairement de 76 centimètres. Ainsi, pour un centimètre de base, la colonne soulevée a un volume de 76 centimètres cubes; et son poids, qui est égal au volume multiplié par la densité, est par conséquent de $76 \times 13,59$, ou de $1^k, 033$; car la densité du mercure est de 13,59. La colonne d'air atmosphérique qui repose sur la mer et qui a un centimètre de base, a donc dans toute sa hauteur un poids de $1^k, 033$; on peut même pousser plus loin le calcul, et trouver le poids de la masse entière de l'air qui compose l'atmosphère, car autant il y a de centimètres carrés dans la surface de la terre, autant il y a de fois $1^k, 033$ dans le poids total de l'air. Le rayon du globe étant de 636745 mètres, sa surface est d'environ 100 mille myriamètres; sur chaque myriamètre le poids est d'un million de millions de tonnes, de mille kilogrammes chacune; ainsi, le poids total de l'air est de cent mille millions de millions de tonnes. Voilà donc le poids total de l'air, des vapeurs, et des exhalaisons de toutes sortes qui composent l'atmosphère. Il sera curieux d'examiner, comme nous le ferons plus tard, si cette masse de substances gazeuses éprouve des variations accidentelles, ou des variations séculaires, et si elle a sensiblement changé depuis que Toricelli et Pascal l'ont pesée pour la première fois.

75. *Construction du baromètre.* — On donne à cet instrument des formes différentes suivant l'usage auquel on le destine; mais il y a quelques conditions générales d'exactitude qu'il faut toujours remplir, quelle que soit la forme que l'on adopte.

1^o Il faut que le mercure soit très pur, parce que sa densité s'altère avec sa pureté.

2^o Quand la colonne monte ou descend dans l'intérieur du tube, la surface extérieure s'abaisse ou s'élève, et il faut disposer l'appareil pour qu'on puisse à chaque instant mesurer la hauteur du baromètre, c'est-à-dire la hauteur verticale du niveau intérieur au-dessus du niveau extérieur.

3^o Il faut que le vide soit parfait au-dessus du sommet de la colonne barométrique; car s'il restait un peu d'air dans cet espace, ou s'il y avait quelques vapeurs, ce serait une force élastique qui agirait sans cesse pour repousser le mercure, et qui l'empêcherait de monter à son vrai niveau.

Pour obtenir le vide aussi exactement qu'il est possible, on fait bouillir le mercure de la manière suivante (Fig. 89) : on remplit le tube au tiers de sa longueur, et on le fait bouillir à plusieurs re-

prises dans toute cette étendue; ensuite on verse une nouvelle quantité de mercure qui soit un peu chaud, pour ne pas faire éclater le tube, et on recommence l'ébullition dans toute la longueur de cette nouvelle colonne; on ajoute ainsi de nouvelles quantités de mercure, que l'on fait successivement bouillir jusqu'à ce qu'enfin l'ébullition ait parcouru toute la longueur du tube ou à très peu près; alors on achève de le remplir avec du mercure bouilli, et le baromètre est terminé. Cependant il est bon de vérifier si par le retournement on n'aurait pas laissé entrer quelques bulles d'air; il faut pour cela incliner le tube un peu vivement pour que le mercure vienne en frapper le sommet; s'il donne un coup sec, on peut espérer que le vide est assez bien fait, sinon l'opération est certainement manquée.

Quand toutes ces conditions sont remplies, il y a encore, en général, deux corrections à faire pour avoir la hauteur du baromètre: l'une est relative à la capillarité, et l'autre à la température, à laquelle se trouve le mercure au moment de l'observation. Le sommet de la colonne barométrique est arrondi par la capillarité, et en même temps il est retenu par elle à une hauteur d'autant moindre que le tube est plus étroit. Nous donnerons dans la météorologie les tables nécessaires pour faire les corrections qui dépendent de cette cause; mais nous pouvons dès à présent faire remarquer que dans certains baromètres le sommet de la colonne est loin d'être convexe, comme il devrait être: quelquefois il est plan, quelquefois même il est concave; Don Casbois avait observé ce fait, et on en avait donné diverses explications; mais M. Dulong a fait voir que ce phénomène singulier tient à un oxide de mercure qui se forme pendant l'ébullition, et qui se dissout dans le reste de la masse. Il faut donc avoir grand soin de ne pas faire bouillir le mercure au contact de l'air, car les corrections de la capillarité supposent essentiellement que la colonne prend toute la convexité qu'elle doit prendre. Nous donnerons pareillement des tables de correction pour la température, et l'on conçoit combien elles sont importantes, puisque le mercure, en se dilatant, devient de plus en plus léger, et que par cette cause la colonne peut être trop haute de plusieurs millimètres.

On distingue deux sortes de baromètres: les *baromètres à siphon* et les *baromètres à cuvette*. Les premiers sont ceux dont le tube est recourbé à sa partie inférieure en forme de siphon (Fig. 91), tandis que dans les derniers le tube est tout droit, et plonge par son extrémité dans une cuvette plus ou moins large (Fig. 90).

76. Le *baromètre ordinaire* est un baromètre à siphon (Fig. 90), porté sur une monture en bois; l'échelle des hauteurs est ordinairement en métal; le zéro de sa division est fixe, et se trouve au niveau du mercure de la courte branche; ce niveau changeant quand le baromètre change, il en ré-

sulte des erreurs d'autant plus grandes que la courte branche est plus étroite.

77. Le *baromètre à robinet* (Fig. 90 bis) est un baromètre à siphon, qui porte à sa patric inférieure une garniture en fer et un robinet de même métal. Pour transporter cet instrument on l'incline d'abord, de manière que la branche fermée se remplit complètement de mercure; alors on ferme le robinet, et on a moins à craindre que l'air ne pénètre dans le tube par les secousses du voyage.

78. Le *baromètre à cadran* est un baromètre à siphon, dont le mécanisme est représenté (Fig. 97). Une poulie mobile, faisant partie de la monture, porte, au moyen d'un fil de soie, deux petits poids qui ne sont pas tout-à-fait égaux: le plus lourd tombe sur la surface du mercure et partage tous ses mouvements; il monte quand elle monte, et descend quand elle descend: le plus léger fait l'office de contre-poids, en sorte que la poulie est toujours entraînée, tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre; en même temps l'aiguille qu'elle porte parcourt les divisions du cadran, et marque, selon le préjugé, le beau, le variable ou la tempête. On s'arrange pour que les variations extrêmes du baromètre ne puissent pas faire parcourir à l'aiguille plus d'une révolution du cadran; car elle passerait alors sur une même division pour deux hauteurs différentes, et le baromètre dirait deux fois la même chose dans deux circonstances très différentes, ce qui ne serait pas le moyen de dire toujours la vérité. Habituellement on met la tempête au-dessus du cadran, et le beau fixe dans le bas, le variable prend sa place au milieu; on préfère ce baromètre quand on recherche l'agrément, mais on ne s'en sert jamais quand on veut de l'exactitude.

79. Parmi les baromètres à siphon, il y en a un qui réunit tous les avantages, soit pour l'exactitude de ses indications, soit pour la facilité avec laquelle on peut le transporter dans les voyages les plus difficiles: c'est le baromètre de M. Gay-Lussac. Comme il est sans robinet, sans piston, sans bouchon même, on peut faire une observation en moins d'une minute. « Pour mieux faire concevoir ce qui caractérise ce baromètre, dit M. Gay-Lussac, je le supposerai dépouillé de sa monture, qu'on peut varier d'ailleurs d'une infinité de manières. La figure 91 représente le tube barométrique dans sa situation propre à l'observation. N n sont les deux niveaux du mercure; la grande branche A B est d'un égal diamètre jusqu'en F. En ce point le tube AF est soudé avec un autre tube FBC, fort, en verre, dont le diamètre intérieur doit être de 1 à 2 millimètres. La petite branche CD du baromètre doit avoir le même diamètre que la partie NF de la grande. Elle est fermée en D; mais on E, à la distance de 2 à 3 centimètres de D, se trouve un petit trou capillaire par lequel le mercure ne peut point s'échapper à moins d'une pression très grande, et

qui néanmoins permet à l'air d'entrer dans la cuvette et d'en sortir librement.

« La figure 92 représente le baromètre renversé; le mercure occupe la partie CBFA du tube, et l'excédant est logé en D. Il convient que cet excédant soit nul ou au moins très petit. On fait sortir très aisément le mercure en tenant la branche CD horizontalement, le trou E en-dessous; le mercure étant su-dessus du trou, on dilate l'air en chauffant la branche CD, et le mercure est alors expulsé. Si au contraire on veut faire rentrer du mercure dans le baromètre, en le plonge, dans la situation où le représente la figure 91, dans un bain de mercure jusqu'au-dessus du trou E, et on incline le tube. L'air étant alors dilaté dans la branche CD, le mercure y rentrera, pourvu que la perte de l'élasticité de l'air soit plus grande que la longueur de la colonne dont le mercure s'abaisserait dans un tube dont le diamètre serait égal à celui du trou. J'ai supposé ici que le baromètre n'avait d'autre ouverture que le trou capillaire E; mais il est bien plus facile de régler le baromètre pendant qu'il est ouvert en D.

« La figure 93 représente le baromètre dans la même position que la figure 92, avec cette différence seulement que la branche BFA est supposée vide de mercure depuis B jusqu'en G; ce qui peut arriver en imprimant au baromètre des secousses violentes. Dans ce cas, l'instrument ne pourrait plus servir si le tube CBGF avait un diamètre aussi grand que le tube AF, parce qu'en renversant l'instrument, l'air contenu en BG monterait nécessairement dans sa partie supérieure; mais si le tube CBGF n'a su plus que 2 millimètres, comme je l'ai indiqué, la colonne GF du mercure ne pourra pas être divisée par l'air, et celui-ci sera expulsé par la chute du mercure lorsqu'on retournera le baromètre. Il arrivera même quelquefois que la colonne G A restera suspendue, quoique plus grande que la pression barométrique; mais en donnant une légère secousse à l'instrument, de haut en bas, la colonne tombera aussitôt, et l'air contenu en BG sera chassé.

« Il y a donc deux choses qui caractérisent le nouveau baromètre; 1^o le petit trou capillaire E, qui laisse une libre circulation à l'air, et empêche cependant le mercure de sortir; 2^o le tube CBF d'un diamètre assez étroit pour que l'air ne puisse pas diviser la colonne de mercure, comme cela a lieu dans l'ingénieux baromètre conique d'Amontons.

« En construisant ce baromètre il faut que l'artiste ait l'attention de ne point porter d'huile dans la branche BCD, soit en la fermant en D, soit en faisant le petit trou E. J'ai déjà dit que c'est l'huile ou tout autre corps gras qui est la cause de la poudre noire ou de la crasse qui se forme dans les baromètres, quand le mercure est d'ailleurs bien pur, et on ne saurait l'exclure avec trop de soin. J'ai fait faire plus de cinq cents lieues à mon baromètre; M. Descotils, dans un voyage en Italie, lui en a fait faire plus de douze cents, et je puis affir-

mer que le mercure était aussi net que le premier jour, malgré les secousses continuelles auxquelles il a été exposé dans une chaise de poste....

« On voit aisément pourquoi l'axe du tube AF n'est pas dans le prolongement de celui du tube FB; c'est afin que le centre de gravité de l'instrument soit sur cet axe lorsque l'instrument sera suspendu librement en A (Fig. 94).....

« Le transport de ce baromètre est très facile, et il ne pourra se déranger si l'on a l'attention de le tenir renversé, comme l'indique la figure 92, ou au moins incliné sous un angle de quinze à trente degrés. J'ai annoncé qu'il ne fallait pas plus d'une minute pour l'observer; et, en effet, il suffit de le renverser pour qu'il se prête immédiatement à l'observation.

« On peut le monter de beaucoup de manières; par exemple, le mettre dans une canne fendue dans toute sa longueur, et qui s'ouvre à charnière (Fig. 94); mais je préfère l'enfermer dans un tube creux de métal, fendu dans une partie de sa longueur, et recouvert par un autre tube qui peut glisser longitudinalement on tourner à léger frottement sur le premier. Si l'on adopte cette dernière construction, le tube extérieur doit aussi être fendu pour laisser voir la colonne de mercure ou la cacher, suivant que les fentes des deux tubes seront ou ne seront pas appliquées l'une sur l'autre.

« On peut encore, si l'on veut avoir un instrument peu dispendieux, tracer les divisions sur le verre même, et enfermer le tube barométrique dans un tube de fer-blanc qui s'ouvre à ses deux extrémités. Il n'est pas alors nécessaire de se servir d'un vernier, parce que les divisions étant près de mercure, on évite facilement l'effet de la parallaxe, et on peut, avec un peu d'habitude, évaluer avec l'œil 1/3 et même 1/10 de millimètre, pourvu que l'on observe l'origine de la courbe du mercure. Enfin, si l'on voulait se conserver la facilité de nettoyer le tube CD, dans la crainte que le mercure ne se ternît à la longue, on pourrait se contenter de le fermer en D avec une peau ou avec un liège.

« La manière de se servir du nouveau baromètre ne présente aucune difficulté; on observe la hauteur de la colonne inférieure et celle de la colonne supérieure, et on les retranche l'une de l'autre. Si les deux branches sont d'un égal diamètre, il suffira d'observer la hauteur de la colonne supérieure, et de doubler les variations apparentes pour avoir les variations réelles. Lors même que les deux branches n'auraient pas un égal diamètre, on pourrait encore se contenter d'une seule observation, pourvu que l'on connaît les vraies différences de niveau de centimètre en centimètre, parce que dans l'intervalle on pourrait regarder, sans erreur sensible, les deux branches comme ayant le même diamètre. Cet avantage, commun à tous les baromètres à siphon, est très précieux pour les voyages géodésiques; car on fait d'autant plus d'observations qu'elles sont plus faciles à faire. »

Un jeune artiste, M. Buntén, a fait un baromètre du M. Gay-Lussac au léger changement qui paraît offrir quelques avantages; il suffit, pour en prendre une idée, de jeter les yeux sur la figure 91 bis. On voit que l'air qui tendrait à monter dans le vide barométrique serait arrêté en B.

80. *Baromètre de Fortin.* — Le baromètre de Fortin (Fig. 96) est un baromètre à cuvette; ce qui le distingue, c'est qu'il est à niveau fixe. Ce niveau est marqué par l'extrémité d'une pointe d'ivoire. La cuvette a un fond mobile; il suffit de tourner la vis V dans un sens ou dans l'autre pour faire monter le niveau ou pour le faire descendre; en même temps qu'on la tourne on observe l'image de la pointe d'ivoire qui se réfléchit sur la surface brillante du mercure, et il est facile d'amener le niveau exactement en contact avec l'extrémité de la pointe. C'est par là qu'on commence toutes les observations. Le tube de métal qui enveloppe le tube de verre est fendu des deux côtés vers sa partie supérieure, et il porte des divisions qui sont comptées de l'extrémité même de la pointe, de telle sorte qu'il suffit de diriger par les deux fentes un rayon visuel, qui rase la surface de la colonne, et de voir à quelle division il correspond. Pour éviter les erreurs que l'on pourrait commettre en s'écartant au-dessus ou au-dessous de la ligne horizontale, il y a un curseur qui glisse sur le tube de métal, et qui n'est fendu que dans une petite partie de sa longueur; la fente qui est en avant et celle qui est derrière, se terminent par deux plans de même niveau, perpendiculaires à la longueur du tube. On abaisse le curseur jusqu'à ce que le rayon visuel qui rase ces plans rase pareillement le sommet de la colonne; alors il suffit de voir à quelle division du tube correspondent les plans, ce qui est très facile, parce qu'ils forment le zéro du nonius du curseur. De cette manière on peut avoir la hauteur du baromètre à moins de 1/20 de millimètre.

81. *Variations du Baromètre.* — Nous ne savons rien de ce qui se passe dans les hautes régions de l'air; ici, à la surface de la terre, nous observons des changements de température, tantôt périodiques, tantôt brusques et inattendus; nous observons des vents et des orages, mais nous ne pouvons juger des secousses atmosphériques que jusqu'à la hauteur où l'agitation des nuages nous en permet l'observation. Au moyen du baromètre nous serons instruits de ce qui se passe dans toute la hauteur de l'atmosphère; car il nous donne à chaque instant le poids de la colonne d'air, et c'est exactement comme si nous avions toute cette colonne en équilibre dans une balance.

On présume bien d'après cela que dans un même lieu le baromètre ne reste pas stationnaire dans le cours d'une année, et qu'il éprouve des variations plus ou moins considérables. Et en effet, à Paris, par exemple, il n'y a presque pas de jours où il ne change de plusieurs millimètres. En général on distingue deux espèces de variations dans le baromètre, les variations occidentales et les variations

horaires; celles-ci se reproduisent très régulièrement à des heures marquées, et sent d'une grandeur constante; les autres surviennent irrégulièrement sans qu'on en puisse prévoir ni l'époque ni l'étendue.

82. *Hauteurs moyennes.* — Comme les variations ne sent jamais très promptes, si on observait le baromètre d'heure en heure, vingt-quatre fois dans la journée, qu'on ajoutât les vingt-quatre hauteurs observées, et qu'on en prit la vingt-quatrième partie, on aurait très exactement la hauteur moyenne du jour; car on aurait le même résultat que si l'on eût observé de demi heure en demi heure, ou même de minute en minute. Mais on conçoit que s'il fallait essentiellement passer par les vingt-quatre observations pour avoir la hauteur moyenne d'un jour, il faudrait, quelle qu'en soit l'importance, désespérer d'y arriver jamais. Quel observateur pourrait s'assujettir pendant des années entières à une régularité aussi minutieuse et aussi mécanique?

C'est sans doute pour cette raison que l'on a été si long-temps avant de savoir trouver des moyennes qui pussent servir à quelque chose: tantôt on ajoutait la hauteur maximum et la hauteur minimum, et on en prenait la moitié, tantôt on employait de la même manière les hauteurs du lever du soleil et celles de deux heures, tantôt on faisait d'autres combinaisons qui n'étaient ni moins arbitraires ni moins inexactes. Enfin M. de La Place a donné la théorie complète de l'équilibre barométrique; et plusieurs grands observateurs, à la tête desquels on doit placer M. Ramond et M. de Humboldt, nous ont appris tout ce qu'on pouvait tirer du baromètre, soit pour la météorologie, soit pour les grands nivellements géographiques. M. Ramond, dans l'excellent ouvrage qu'il a publié sur ce sujet, a fait voir, par une longue suite d'expériences, qu'il existe une heure de la journée où la hauteur du baromètre est très sensiblement la hauteur moyenne du jour. Cette heure est, dans nos climats, l'heure de midi: ainsi on est dispensé de faire vingt-quatre observations dans la journée; que l'on en fasse une seule avec exactitude à l'heure de midi, et l'on aura la hauteur que l'on cherche. On conçoit qu'en ajoutant les trente hauteurs moyennes des trente jours du mois, et prenant le trentième de la somme, on aura la hauteur moyenne du mois; et qu'en traitant de même les douze moyennes des douze mois, on aura enfin la hauteur moyenne de l'année. Ce résultat est fondamental et très important à connaître pour chaque lieu de la terre; mais M. Ramond a encore démontré que dans nos climats le phénomène curieux des variations horaires ne peut ni se démentir, ni se mesurer exactement, à moins qu'on ne détermine encore les moyennes mensuelles et annuelles qui correspondent à certaines heures de la journée. C'est pour

cela que les observateurs qui veulent concourir d'une manière utile au progrès de la science observent régulièrement le baromètre quatre fois par jour, et aux heures précises de 9 heures du matin, de midi, de 3 heures du soir et de 9 heures du soir.

A Paris, la hauteur moyenne n'est pas la même pour toutes les années, mais les variations qu'elle éprouve ne sont pas considérables; en dix années, de 1816 à 1825, la plus grande différence n'est pas de quatre millimètres; voici le tableau des résultats.

ANNÉES.	HAUTEUR moyenne.	MINIMUM.	MAXIMUM.	DIFFÉR.
	millimètres.	millimètres.	millimètres.	millim.
1816	754,161	730,57	772,76	42,19
1817	756,400	730,61	772,92	42,31
1818	756,065	733,78	771,49	37,71
1819	755,103	738,56	772,45	33,89
1820	756,002	733,19	769,67	36,48
1821	756,065	719,03	780,89	61,86
1822	757,472	737,18	771,46	34,28
1823	754,969	723,05	772,30	49,25
1824	755,750	728,87	773,45	44,58
1825	757,679	728,63	776,46	47,83
Moyenne des 10 an.	755,966	730,35	773,38	43,04

Ainsi, à Paris, la hauteur moyenne de dix années est à très peu près 756 millimètres.

La moyenne des hauteurs minimum est de 730^{mm}35; la moyenne des hauteurs maximum de 773,38; enfin la moyenne d'oscillation de l'année est de 43,04, c'est-à-dire qu'à Paris c'est dans une longueur de 43,04 que s'accomplissent en général toutes les variations barométriques de l'année.

83. *Variations accidentelles.* — En chaque lieu le baromètre est en oscillation continue au-dessus et au-dessous de la moyenne de l'année, et quelquefois il éprouve des secousses qui le font tomber du beaucoup au-dessous; à Paris, il descend assez fréquemment jusqu'à 740. On voit par le tableau précédent qu'il est descendu à 730, à 728, à 723, et qu'en décembre 1821 il est tombé à 719,03; c'est la plus grande dépression qui ait été observée à Paris depuis 1785; car c'est de cette époque seulement que l'on fait à l'Observatoire une série régulière d'observations météorologiques avec des instruments qui méritent confiance. On voit que le baromètre éprouve aussi des ascensions assez considérables; il atteint assez fréquemment à 770; et en février 1821, il s'est élevé jusqu'à près de 781. Il est remarquable que les deux variations extrêmes qui

ont eu lieu dans le cours de dix années soient à des époques si rapprochées l'une de l'autre, et que l'année où elles se trouvent ne donne en dernier résultat qu'une moyenne tout-à-fait ordinaire. De 719,03 à 780,89, la différence est 61^{mm}86, ou à peu près 28 lignes; ainsi, dans dix ans, le baromètre à Paris a éprouvé des oscillations extrêmes d'autant de lignes qu'il y a de pouces dans sa hauteur ordinaire.

Les variations du baromètre indiquent un changement présent dans l'atmosphère; beaucoup de personnes pensent qu'elles annoncent aussi un changement futur, et qu'il suffit de savoir bien consulter le baromètre pour prédire à coup sûr la pluie ou le beau temps plusieurs jours à l'avance; c'est une question de météorologie que nous examinerons plus tard. Mais il n'est peut-être pas inutile de donner ici le tableau des pressions différentes que supporte une surface de 1 mètre carré, suivant les hauteurs du baromètre.

HAUTEUR du baro- mètre en millim.	PRESSION sur un mètre carré en kilog.	HAUTEUR du baro- mètre en millim.	PRESSION sur un mètre carré en kilog.	HAUTEUR du baro- mètre en millim.	PRESSION sur un mètre carré en kilog.
mm	h	mm	h	mm	h
500	6793	600	8152	700	9510
510	6929	610	8287	710	9646
520	7065	620	8423	720	9782
530	7201	630	8559	730	9918
540	7336	640	8695	740	10054
550	7472	650	8831	750	10189
560	7608	660	8967	760	10325
570	7744	670	9103	770	10461
580	7880	680	9238	780	10597
590	8016	690	9374	790	10733

On voit que, le baromètre étant à 780, une surface de 1 mètre carré supporte 10597 kilogr., et que cette énorme charge se réduit à 9782 kilogr. quand le baromètre tombe à 720; ainsi, la surface entière de notre corps étant à peu près de 1 mètre carré, nous sommes dans ces circonstances soulagés d'un poids de 815 kilogr. Une cause aussi puissante exerce nécessairement une influence sur les fonctions physiologiques, et surtout sur les phénomènes de la respiration et de la circulation, mais ses effets sont en général si compliqués qu'il faudra sans doute de longues expériences pour parvenir à les déceler.

La hauteur de 600 millimètres est à peu près celle qui a lieu au-dessus du Mont-d'Or et à la poste du Mont-Cenis; un voyageur qui part du niveau de la mer pour s'élever sur ces montagnes est soulagé d'un poids de 2173 kilogrammes, et il est soulagé de 3532 kilogrammes lorsqu'il arrive en un lieu où le baromètre marque seule-

ment 500 millimètres; c'est à peu près sa hauteur ordinaire sur l'Etna et sur le Mont Liban. On sait tout ce que les voyageurs racontent des sensations extraordinaires que l'on éprouve au sommet des hautes montagnes où le baromètre ne marque plus que 400 ou 500 millimètres. On voit de toutes parts un immense horizon, on est soulagé d'un pesant fardeau, on ne respire qu'un air pur et léger, et il semble en effet que l'on ne touche plus à terre.

Les variations accidentelles du baromètre n'ont pas la même étendue dans tous les climats, ni à toutes les hauteurs; les limites entre lesquelles elles se produisent sont en général d'autant plus écartées l'une de l'autre, que la latitude est plus grande. Dès 1690 le père Du Bézou avait reconnu qu'à Pondichéry et à Batavia le baromètre reste immobile, quelles que soient les tempêtes que l'on éprouve; Legendil avait fait plus tard la même observation aux mêmes lieux, et maintenant il est bien démontré que dans toute la zone équatoriale, le baromètre est en effet insensible à toutes les grandes secousses atmosphériques, mais qu'il éprouve cependant des variations périodiques et régulières, que l'on appelle variations horaires.

84. C'est vers l'année 1722 que les *variations horaires* du baromètre furent constatées d'une manière certaine par les observations d'un Hollandais, dont le nom reste inconnu. Depuis cette époque, plusieurs observateurs ont essayé d'en déterminer l'étendue et les périodes pour différens lieux de la terre. M. de Humboldt a démontré, par de longues séries d'observations très précieuses, que sous l'équateur le *maximum* de hauteur correspond à 9 heures du matin; passé 9 heures le baromètre descend jusqu'à 4 heures, ou même $4\frac{1}{2}$ de l'après-midi, où il atteint son *minimum*; ensuite il remonte jusqu'à 11 heures du soir, où il arrive à un second *maximum*, et il redescend enfin jusqu'à 4 heures du matin. Ainsi, chaque jour il passe par les deux *minimum* de 4 heures du matin et de 4 heures du soir, et par les deux *maximum* de 9 heures du matin et de 11 heures du soir. Les mouvemens de dépression et d'ascension sont si réguliers, qu'ils pourraient servir à marquer les heures, comme les mouvemens de l'horloge. Seulement, ils ont peu d'amplitude; car ils s'accomplissent dans une longueur que M. de Humboldt évalue à deux millimètres depuis le point le plus haut du matin jusqu'au point le plus bas de l'après-midi.

Dans nos climats, ces variations horaires sont tellement dissimulées par les variations accidentelles, qu'il fallait, pour les découvrir et pour les mesurer, toute la sagacité et toute la précision d'un observateur tel que M. Raimond. Ce n'est que par les moyennes de plusieurs mois d'observations prises avec exactitude et aux heures convenables, que l'on peut trouver les périodes horaires. M. Raimond a reconnu que leurs époques varient avec les saisons. En hiver, le *maximum* est à 9 heures du

matin, le *minimum* à 3 heures de l'après-midi, et le second *maximum* à 9 heures du soir.

En été, le *maximum* a lieu avant 8 heures du matin, le *minimum* à 4 heures de l'après-midi, et le second *maximum* à 11 heures du soir.

Au printemps et en automne, les heures *critiques* sont intermédiaires, se rapprochant plus ou moins de celles de l'été ou de celles de l'hiver. L'étendue absolue des variations est un peu moindre qu'à l'équateur. Dans les latitudes les plus élevées, il faut comparer et discuter un plus grand nombre d'observations pour en faire sortir les périodes horaires; et, sur ce point, la science a beaucoup à désirer; cependant en traitant de la météorologie, nous discuterons tous les résultats importants des observations barométriques, et nous verrons aussi les nombreuses applications du baromètre.

85. *Loi de Mariotte.* — La loi de Mariotte est la loi de la compressibilité des fluides élastiques; elle exprime le rapport qui existe entre les volumes et les pressions. Ce rapport est très simple : les volumes des gaz sont en raison inverse des pressions qu'ils supportent. Pour démontrer par l'expérience cette vérité fondamentale, on prend un tube reconché (Fig. 88), dont la courte branche est cylindrique, et fermée à son extrémité, et dont la longue branche reste ouverte pour recevoir la pression atmosphérique. On y verse du mercure, d'abord en petite quantité; et en inclinant le tube pour faire sortir une partie de l'air de la courte branche, on arrive facilement à mettre le mercure au même niveau dans les deux branches. Alors, l'air enfermé dans l'espace *ab* se trouve exactement sous la pression atmosphérique; et si, à partir de ce point, on le force à se resserrer dans la moitié, le tiers, ou le quart de la longueur *ab*, on aura réduit son volume à la moitié, au tiers, ou au quart de ce qu'il est, à cause que le tube est cylindrique. Pour cela, on verse du mercure par la branche ouverte, et on en verse jusqu'à ce que le sommet de la petite colonne soit parvenu au point *m*, milieu de la longueur *ab*; ce point *m*, et le point *n* qui lui correspond dans la grande branche, supportent l'un et l'autre la même pression, puisqu'ils sont au même niveau; cette pression est de deux atmosphères, car elle se compose du poids de la colonne *na*, que l'on trouve toujours égale en hauteur à la colonne barométrique, et de la pression atmosphérique elle-même qui s'exerce encore au sommet de la colonne. Donc, il a fallu une pression double pour réduire à moitié le volume de l'air contenu dans la courte branche. En donnant à l'appareil une branche ouverte beaucoup plus longue, on démontre de la même manière qu'il faut une pression de trois atmosphères pour réduire le volume au tiers, et de quatre atmosphères pour le réduire au quart de ce qu'il était sous une seule pression atmosphérique. Cette loi, découverte par Mariotte en France, et à peu près à la même époque par Boyle en Angleterre, a été depuis confir-

mée de plusieurs manières, soit pour des pressions moindres que la pression atmosphérique, soit pour des pressions de plusieurs atmosphères. On a démontré aussi qu'entre ces limites elle s'applique à tous les gaz.

Cependant, au-delà de ces limites, la loi de Mariotte restait incertaine; on ne pouvait l'appliquer avec confiance ni pour les recherches théoriques ni pour les applications. MM. Arago et Dulong, chargés par l'Académie des Sciences, en 1828, de déterminer les tensions de la vapeur d'eau dans les températures élevées, ont commencé par chercher la loi de compressibilité de l'air, et ils ont poussé leurs expériences jusqu'à la pression de 27 atmosphères. Nous devons essayer de donner ici une idée de ce travail, qui est l'un des plus importants et des plus remarquables qui aient été entrepris dans ces derniers temps.

Les appareils avaient été établis ou collégés Henri IV dans une vieille tour carrée, au centre de laquelle on avait pu facilement élever un mât en bois d'une centaine de pieds de hauteur. Au pied du mât était un fort vase en fonte avec un manomètre et une pompe foulante, et contre sa hauteur un tube vertical en verre de 75 à 80 pieds de longueur (il était composé de 13 tubes de 6 pieds mis bout à bout).

On prendra une idée de cette disposition en jetant les yeux sur la figure 228.

VV' est le vase en fonte,

P la pompe foulante,

NN' le manomètre, fermé à son extrémité supérieure;

TT' le tube vertical, ouvert en haut, et

AA' le mât contre lequel il s'élève.

Si l'on suppose 1^o que le vase en fonte contienne du mercure, 2^o que le tube du manomètre soit gradué et contienne de l'air sec, 3^o que le mercure s'élève à la même hauteur dans le tube du manomètre et dans le tube vertical TT', il est évident que l'air sera enfermé sous la pression atmosphérique et que l'on connaitra le volume qu'il occupe sous cette pression. Maintenant, si à partir de ce point, l'on fait agir la pompe foulante pour introduire de l'air ou de l'eau au-dessus de la surface supérieure du mercure dans le vase en fonte, on exercera ainsi des pressions toujours croissantes sur l'air sec du manomètre, et en même temps le mercure s'élèvera de plus en plus dans le tube vertical. Enfin, pour avoir à chaque instant le volume de l'air comprimé, il suffira d'observer exactement la longueur qu'il occupe encore dans le tube du manomètre à partir de l'extrémité fermée; et pour avoir la pression correspondante, il suffira de mesurer la différence des niveaux du mercure dans le tube du manomètre et dans le tube vertical.

Or, le tube vertical ayant 78 pieds, ou plus de 30 fois 28 pouces, on pourrait pousser l'expérience jusqu'à une trentaine d'atmosphères, s'il ne fallait pas déduire de cette colonne la hauteur du mer-

cure dans le manomètre : c'est pour cette raison que les expériences ont été limitées à 27 atmosphères.

On conçoit facilement que des expériences de cette nature exigeaient toute l'habileté dont MM. Arago et Dulong ont donné tant de preuves par leurs belles découvertes dans toutes les branches de la physique. Il nous serait impossible de décrire ici, dans tous ses détails, la perfection avec laquelle les diverses pièces de l'appareil étaient ordonnées et toutes les précautions ingénieuses qui avaient été prises pour assurer l'exactitude des résultats. Nous indiquerons seulement quelques-unes des dispositions les plus essentielles de la pompe foulante, du tube vertical, et du manomètre.

Pompe foulante. — Il ne fallait pas seulement que la pompe foulante fût assez bien faite pour injecter l'eau sous une pression de 27 atmosphères, il fallait encore qu'elle pût maintenir l'eau injectée d'une manière assez rigoureuse pour que les sommets des colonnes de mercure fussent parfaitement fixes dans le manomètre et dans le tube vertical. Cette condition était remplie au moyen de la soupape B, qui se trouve au bas de la course du piston. De plus, ce que nous disons ici de la soupape de la pompe s'applique à toutes les jointures de l'appareil : elles devaient être assez exactement faites pour qu'il n'y eût aucune fuite.

Tube vertical. — Il était composé de 13 tubes de cristal fabriqués exprès dans la verrerie de Choisy par MM. Thibaudéan et Bontemps. Chacun de ces tubes avait 2 mètres de longueur, 5 millimètres de diamètre intérieur et 5 millimètres d'épaisseur; ils étaient réunis par de fortes viroles, comme on le voit en C, figure 228, et plus en détail dans la figure 225. La plaque horizontale H sert de repère; il y en a une pareille au bas de chaque tube, et l'on mesure la distance de deux repères consécutifs en posant la règle divisée sur le repère inférieur et en poussant une petite languette L, figure 225, jusqu'à ce qu'elle se trouve à l'affleurement du repère supérieur. Pour que les tubes inférieurs ne fussent pas surchargés et comme ébranlés par le poids des tubes supérieurs, on avait eu l'heureuse idée d'attacher à l'extrémité supérieure de chaque tube des cordons qui redescendaient verticalement après avoir passé sur des poulies et qui étaient tirés en bas par des poids égaux au poids du tube (Fig. 225). Ainsi la colonne n'exerçait aucune pression sur sa base.

Manomètre. — Le tube manométrique était semblable à ceux de la colonne verticale, seulement il avait été effilé à son extrémité supérieure, gradué avec soin, sans rien tracer au diamant sur sa surface, de peur d'affaiblir sa résistance, et ensuite ajusté sur la platine E du vase en fonte. Alors on y avait fait passer pendant long-temps un courant d'air sec, et enfin on avait scellé à la lampe son sommet effilé, sans faire éprouver une altération

sensible à sa graduation. On voit dans la figure 226 comment l'extrémité inférieure du tube manométrique est ajustée sur la platine E du vase en fonte; on doit remarquer que la virole se recourbe sous l'épaisseur du tube, afin que la pression ne tende pas à le soulever. Pour que l'air du manomètre fût bien maintenu à la même température, on l'avait enveloppé d'un manchon de verre HH' dans lequel passait continuellement un courant d'eau. Enfin, pour voir avec une grande exactitude la position du sommet de la colonne de mercure on avait disposé en dedans du manchon un voyant V avec une loupe; cette pièce devait monter et descendre, et on lui donnait ces mouvemens au moyen d'un tourniquet Q sur lequel était enroulé un fil de soie, qui allait passer sur les poulies supérieures L', sur la poulie inférieure L, et qui venait s'attacher à la garniture du voyant.

Des thermomètres (Fig. 227) convenablement disposés donnaient à chaque instant la température des diverses parties de l'appareil; et des baromètres, l'un supérieur et l'autre inférieur, donnaient aussi la pression atmosphérique au sommet de la colonne verticale.

On peut donc admettre la loi de Mariotte comme rigoureusement démontrée pour l'air par l'expérience directe jusqu'à 27 atmosphères, et l'on ne peut guère douter, d'après cela, qu'elle ne s'étende au moins jusqu'à 50 atmosphères sans altération sensible.

La densité d'un corps étant en raison inverse du volume qu'il occupe, on peut encore exprimer la loi de Mariotte, en disant que les densités des gaz sont proportionnelles aux pressions qu'ils supportent. Sans une seule pression atmosphérique, la densité de l'air étant à peu près la 770^e partie de la densité de l'eau, il en résulte que, sous une pression de 770 atmosphères, l'air est aussi dense que l'eau. Ainsi, au fond de la mer, à une profondeur de 770 fois 32 pieds, ou de 24640 pieds, qui font à peu près deux lieues, l'air serait plus pesant que l'eau, et, quoiqu'à l'état gazeux, il ne pourrait pas s'élever pour venir à la surface. Mais rien ne prouve jusqu'à présent qu'il y ait de l'air au fond de la mer, comme rien ne prouve qu'il y ait un liquide au-dessus de l'atmosphère.

Deux volumes successifs, occupés par un gaz, et les deux pressions correspondantes, forment quatre quantités qui sont en proportion; de telle sorte que, trois étant données, on peut trouver la quatrième. Il en serait de même des deux densités successives, avec les deux volumes ou avec les deux pressions correspondantes.

86. De la machine pneumatique. — La machine pneumatique est destinée à faire le vide; elle se compose de deux corps de pompe cylindriques pareils à celui qui est représenté en RR' (Fig. 102.)

PP' est un piston qui monte et qui descend au moyen de la tige T; mais dans toutes ces po-

sitions il tient le vide, c'est-à-dire que rien ne peut passer entre son contour et les parois du corps de pompe.

s est la soupape du piston; elle est très légère, et s'ouvre de bas en haut; elle se lève quand la pression inférieure est un peu plus grande que la pression supérieure, et, dans le cas contraire, elle reste hermétiquement fermée.

La longue tige cr est la soupape du corps de pompe; c'est le piston qui l'ouvre et qui la ferme: quand il monte, il la soulève; le renflement r vient s'appuyer contre la plaque supérieure du corps de pompe, et le piston glisse à frottement dur sur toute la longueur de la tige cr; quand il descend, il l'entraîne avec lui; le trou de cône tombe dans l'ouverture conique qui est au-dessous; sa base ne fait qu'un seul plan avec le fond du corps de pompe, et le piston vient s'appliquer exactement sur ce plan.

Au fond de l'ouverture conique, le conduit de la machine prend naissance, il s'étend ensuite jusqu'en v; à cette extrémité il porte au pas de vis propre à recevoir des ballons, des réceptifs ou d'autres vases dans lesquels on veut faire le vide.

LL' est la platine de la machine pneumatique; elle se compose d'une forte plaque de métal sur laquelle on mastique un plateau de verre de plusieurs lignes d'épaisseur, dont la surface supérieure est dressée avec soin et légèrement doucie.

C est une cloche où l'on veut faire le vide; son bord inférieur est pareillement dressé et douci, afin qu'il puisse s'appliquer exactement sur la platine. Une légère couche de soif achève d'établir l'adhérence; car il ne faut pas, même quand le vide est fait, que l'air extérieur puisse pénétrer entre la cloche et la platine.

Supposons que le piston soit au milieu de sa course, que les soupapes soient ouvertes, et que l'air soit sous la pression atmosphérique, dans la cloche, dans le conduit et dans le corps de pompe; si l'on abaisse le piston, la seconde soupape se ferme, et l'air ne peut plus repasser du corps de pompe dans la cloche; il s'échappe par la première soupape, et il n'en reste plus quand le fond du piston est venu s'appliquer sur le fond du corps de pompe. Alors le piston étant soulevé, le vide se ferait si les soupapes restaient fermées; mais la seconde soupape s'ouvre, l'air de la cloche arrive pour remplir le vide, et la première soupape reste fermée à mesure que le piston s'élève, parce que la pression inférieure est toujours moindre que la pression extérieure. Si la capacité du corps de pompe est, par exemple, la dixième partie de la capacité de la cloche et du conduit, il arrivera dans le corps de pompe 1/11 de l'air qu'il faut enlever pour avoir le vide. On rabaisse le piston; la seconde soupape se ferme, et l'air se comprime de plus en plus: bientôt son élasticité l'emporte sur celle de l'air extérieur; il soulève la première soupape et s'échappe dans l'atmosphère. Un autre coup

de piston fait sortir encore $1/11$ de l'air restant; puis, en continuant ce jeu alternatif, on fait sortir à chaque coup $1/11$ du reste, puis $1/11$ du reste, et ainsi de suite. D'où l'on voit que jamais le vide ne se pourra faire, puisqu'en prenant la onzième partie d'une quantité et la onzième partie des restes successifs, on ne peut jamais parvenir à prendre cette quantité tout entière. Mais on parvient cependant à réduire l'air de la cloche à une élasticité de plus en plus faible; les meilleures machines le réduisent à 1 ou 2 millimètres de tension. La rapidité de l'opération dépend du rapport qui existe entre la capacité du corps de pompe et celle de la cloche. Ce rapport étant donné, on peut calculer facilement combien il faut de coups de piston pour réduire l'air à une tension donnée; et ensuite on peut, par la loi de Mariotte, calculer le poids de l'air qui reste, quand on connaît le poids du volume primitif.

Quand le vide est fait, la pression atmosphérique qui s'exerce sur le piston n'étant plus balancée par aucune pression intérieure, il faut, pour le soulever, faire un effort de 14,033 pour chaque centimètre carré de sa surface, plus encore tout l'effort nécessaire pour vaincre le frottement. Un piston de 1 décimètre de rayon serait aussi difficile à soulever qu'un poids d'environ 300 fois 14,033; ce qui fait plus de 600 livres. Mais dans les machines à deux corps de pompe et à deux pistons, ces pressions se détruisent, et il ne reste à vaincre que les frottements.

La machine pneumatique est représentée dans son ensemble (Fig. 105 et 106). Les tiges des deux pistons sont à crémaillères; elles engrenent dans le même pignon: quand l'une monte, l'autre descend, et leur mouvement alternatif est produit par le mouvement alternatif d'une manivelle.

La clef de la machine est un robinet qui porte une ouverture ordinaire et une ouverture latérale (Fig. 104); celle-ci est conique, et se ferme au moyen d'un bouchon de métal B. Quand la machine doit tenir le vide, on tourne l'ouverture latérale du côté des corps de pompe; et pour rendre l'air, on la tourne du côté de la cloche, et ensuite on tire le bouchon de métal.

Le baromètre qui marque à chaque instant la tension de l'air de la cloche, s'appelle une *épreuve*. Quelquefois c'est un baromètre ordinaire BB', figure 106, et, le plus souvent, c'est un baromètre tronqué. Dans ce dernier cas, l'éprouvette est enfermée dans une cloche longue et étroite VV' (Fig. 102) qui communique au conduit de la machine. Cette communication s'ouvre ou se ferme au moyen d'un robinet. Le baromètre tronqué est vu de profil (Fig. 102), et il est représenté de face (Fig. 99 et 107); s'il a seulement 7 pouces de longueur depuis le niveau extérieur n jusqu'à son sommet s, il ne commence à descendre que quand la pression de l'air est réduite au quart de la pression atmosphérique; enfin, il

descend de plus en plus dans la branche fermée, et monte dans la branche ouverte, de telle sorte que la pression de l'air de la cloche est toujours mesurée par la différence des deux niveaux. Au moment où l'on rend l'air, la pression subite qui s'exerce sur le mercure le refoule avec violence dans la branche fermée, et il est bon d'y ménager un étranglement, de peur qu'il n'en brise le sommet.

La machine pneumatique fut inventée vers 1650, par Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg; elle fut, peu de temps après, changée et perfectionnée par un grand nombre de physiciens. Hook plaça le corps de pompe verticalement, Papin ajouta le platino, Hawksbee fit deux corps de pompe au lieu d'un, et ensuite les soupapes furent modifiées d'une infinité de manières.

86. Otto de Guericke fit avec sa machine l'expérience curieuse des *Hémisphères de Magdebourg*; elle consista à faire le vide dans un globe de métal dont les deux moitiés sont simplement justifiées. Avant que le vide soit fait, les deux hémisphères se séparent facilement; mais quand il y a plus d'air intérieur pour balancer la pression extérieure, l'adhérence est si forte que toute la force d'un homme est insuffisante pour les séparer. En effet, si la section des hémisphères a seulement 1 décimètre de rayon, ou environ 300 centimètres carrés de surface, la pression extérieure qui les unit équivaut à plus de 300 kilogrammes. On met une bande de cuir à la jonction des hémisphères pour favoriser le contact, et il y a un robinet qui s'ouvre pour faire le vide et qui se ferme pour empêcher la rentrée de l'air.

Boyle fut un des premiers et des plus habiles à se servir de la machine pneumatique. Le vide était alors une chose nouvelle; quelques philosophes avaient imaginé autrefois que le vide était possible; mais, avant Toricelli, personne n'avait pu le produire. Dans la chambre barométrique toutes les expériences étaient difficiles, et les académiciens de Florence, malgré tous leurs efforts ingénieux, n'avaient pu obtenir qu'un petit nombre de résultats. Enfin la machine de Otto de Guericke donnait le moyen de faire le vide à volonté dans de très grands espaces; et, ce qui était plus précieux encore, elle donnait le moyen d'exposer directement dans ces espaces, sans air et sans pression, des animaux, des plantes et des corps de toute espèce. On conçoit aisément combien ces expériences devaient exciter la curiosité des physiciens.

Dans le vide les corps enflammés s'éteignent; ainsi l'air contient des éléments qui sont nécessaires à la combustion, et à la production de la flamme.

La fumée tombe comme une masse pesante; ainsi les nuages tomberaient s'il n'y avait pas de l'air pour les soutenir.

Il y a des insectes qui vivent dans le vide pendant plusieurs jours; ainsi ils peuvent passer plusieurs jours sans respirer sensiblement. Les oiseaux

périssent en quelques secondes, même avant que le vido soit complètement fait. Il faut cependant que l'air de la machine soit plus raréfié que l'air qu'ils respirent dans les hautes régions de l'atmosphère où ils s'élèvent.

La plupart des fruits et des substances fermentescibles se conservent très bien dans le vide. Le procédé de M. Appert, pour conserver les substances alimentaires, est une ingénieuse et très utile application de cette vérité.

Une boule mince de verre, remplie d'air, se brise.

On fait jaillir un liquide à une grande hauteur (Fig. 113).

L'eau froide entre en ébullition; ainsi, au sommet des hautes montagnes, où l'air est très raréfié, l'eau doit bouillir plus tôt que dans la plaine, et c'est ce que l'on observe en effet à l'hospice du Saint-Bernard et ailleurs.

87. *Machine de compression.* — La machine de compression est destinée à comprimer l'air. Elle se compose de deux corps de pompe, semblables à ceux de la machine pneumatique; la seule différence est dans les soupapes, qui s'ouvrent en sens contraire; c'est-à-dire de haut en bas. Quand on abaisse le piston, il comprime l'air, et le fait passer dans le récipient; quand on le relève, l'air extérieur ouvre la première soupape et entre dans le corps de pompe, tandis que l'air comprimé du récipient presse la seconde soupape, et la tient fermée. Enfin, quand on rabaisse le piston, la première soupape se ferme, l'air se comprime de plus en plus, il devient capable d'ouvrir la seconde soupape et passe encore dans le récipient, et ainsi de suite.

L'éprouvette de la machine de compression est un tube droit, fermé à son sommet, rempli d'air, et plongeant par son extrémité inférieure dans une cuvette de mercure. Au commencement de l'expérience l'air du tube est sous une pression atmosphérique, et le mercure est au même niveau à l'intérieur et à l'extérieur; à mesure que la pression augmente le mercure monte dans le tube, le volume de l'air se réduit successivement à la moitié, au tiers ou au quart de ce qu'il était, et d'après la loi de Mariotte, on juge qu'il est sous une pression de deux, trois ou quatre atmosphères. Dans le récipient la pression de l'air est plus grande que dans le tube, de toute la hauteur de la colonne de mercure qui s'élève au-dessus du niveau extérieur.

88. Il y a des *pompes de compression* qui sont destinées à être vissées sur divers appareils pour y comprimer de l'air; alors elles se composent simplement d'un corps de pompe et d'un piston sans soupape. Le corps de pompe présente trois modifications particulières (Fig. 108): 1° il porte un pas de vis à son extrémité inférieure; 2° il est muni d'une soupape *s* dont le piston s'approche de très près quand il arrive au bas de sa course; 3° vers sa

partie supérieure, et sur sa paroi latérale, il est percé d'un petit trou *t* qui reste toujours ouvert et qui fait cependant l'office de soupape, parce qu'il est tantôt au-dessus, tantôt au-dessous du piston.

Quelquefois, au lieu d'un petit trou latéral, le corps de pompe porte une véritable soupape latérale (Fig. 109); cette disposition offre l'avantage de pouvoir comprimer des gaz quelconques; car il suffit pour cela de faire communiquer le tube de la soupape au réservoir qui les contient.

89. *Mesure des pressions des gaz contenus dans divers appareils.* — On mesure en général les pressions des gaz par deux moyens: par le moyen des colonnes liquides ou par le moyen des soupapes. Les appareils à colonne liquide s'appellent des *manomètres*, les soupapes s'appellent, en général, *soupapes de pression*, et *soupapes de sûreté* quand elles sont destinées à empêcher les explosions.

90. *Soupapes de pression.* — Ces soupapes sont indéfiniment variables dans leurs formes et dans leurs dimensions; tantôt elles ont la forme d'un cône tronqué (Fig. 110 et 112); tantôt elles sont un simple plan qui s'adapte très exactement sur les parois de l'ouverture (Fig. 111). Dans tous les cas elles doivent fermer hermétiquement jusqu'à l'instant où elles sont soulevées. Pour estimer l'élasticité du gaz qui est capable de les soulever, il faut connaître deux choses, 1° le poids total de la soupape; 2° l'étendue de la surface qui est exposée à la pression verticale du gaz. Supposons que le poids soit évalué en kilogrammes, et que l'étendue de la surface pressée soit évaluée en centimètres carrés: si le poids est, par exemple, de 100 kilogrammes, et la surface de 25 centimètres, chaque centimètre carré supportera 4 kilogrammes; donc, d'après ce que nous avons vu (74), le nombre des atmosphères est égal à $4/1,033$ ou à $3^m,87$, plus encore la pression atmosphérique ordinaire qui s'exerce aussi sur la soupape. Ce même moyen s'applique aux liquides comme aux gaz; c'est celui que l'on emploie pour essayer les tuyaux de conduite et les cylindres des machines à vapeur.

91. *Manomètres.* — Le nom de manomètre avait été donné, par Varignon, à un appareil qu'il destinait à mesurer la raréfaction de l'air. Maintenant on appelle *manomètre* tout appareil à colonne liquide propre à mesurer des pressions. Le baromètre mesure la pression libre de l'atmosphère; le *manomètre* mesure la pression des fluides contenus dans les espaces fermés. L'éprouvette de la machine pneumatique et celle de la machine de compression sont de véritables manomètres. Cependant on peut établir quelques distinctions dans les appareils de cette espèce.

La Figure 103 représente un manomètre, un moyen duquel on mesure la tension des gaz contenus dans le ballon B; il a été employé par De Saussure et ensuite par Berthollet, dans les recherches importantes qu'ils ont faites l'un et l'autre sur la végétation et sur les phénomènes des corps vivants. Les

animaux et les plantes étaient renfermés dans le ballon B.

Les tubes de sûreté sont des manomètres qui indiquent la tension des gaz contenus dans les appareils auxquels ils sont adaptés. Quand la tension est égale à la pression atmosphérique, le liquide est au même niveau dans les deux branches (Fig. 100); et, en général, la différence des niveaux mesure la différence des pressions; il suffit de connaître la densité du liquide contenu dans le tube pour évaluer cette différence de pression en millimètres de mercure.

Les tubes de sûreté ont été inventés par Welter : ils sont d'un grand usage en chimie, parce qu'ils empêchent les explosions et l'absorption. Quand la pression intérieure devient trop faible, l'air atmosphérique refoule le liquide dans la boule et pénètre dans l'appareil ; au contraire, quand elle est trop forte, elle chasse la colonne liquide et trouve une issue par le tube.

Les grands gasomètres qui servent à lancer le gaz de l'éclairage, sous une pression constante, sont munis de manomètres qui communiquent ainsi à l'air extérieur : il en est de même dans les souffleries des forges et dans une foule d'autres appareils industriels.

Quand les pressions doivent être très fortes, on emploie un manomètre analogue à celui de la machine de compression, on enferme de l'air au-dessus de la colonne liquide (Fig. 101), et la réduction de volume qu'il éprouve donne, par la loi de Mariotte, les divers états de pression par lesquels il passe. Seulement il faut tenir compte des variations de chaleur qui peuvent donner à l'air plus ou moins de ressort, comme nous le verrons plus tard.

92. *Fusil à vent.* — Il suffit de nommer cet appareil pour que l'on en devine le mécanisme. La crosse

contient un réservoir à soupape dans lequel on comprime de l'air sous huit ou dix atmosphères. On y ajoute un canon qui reçoit le projectile et qui en dirige le mouvement. On fait partir une détente qui presse la soupape ; l'air sort avec violence, chasse la balle, et la soupape se referme à l'instant. On peut tirer de suite plus ou moins de coups, suivant que le réservoir est plus ou moins grand. Le fusil à vent peut lancer la balle avec autant de vitesse que le fusil à poudre : cet effet ne se produit pas sans bruit ni sans lumière. L'air comprimé, se débarrassant subitement, fait une explosion pareille à celle du crève-vessie ; et à l'extrémité du canon on voit un jet de flamme qui est produit par le frottement des petites poussières solides que l'air rencontre ou qu'il emporte avec lui ; car il paraît que dans un air très pur il n'y a plus de flamme perceptible.

93. *Appareils d'gaz portatif.* — Dans ces appareils nouveaux, le gaz de l'éclairage est comprimé sous trente atmosphères. Les réservoirs, avant d'être employés, sont soumis à une forte épreuve : ils ne sont admis au service que quand ils ont pu résister à soixante atmosphères. Il y a deux sortes d'explosions à craindre : celle qui résulterait d'un mélange du gaz avec l'air atmosphérique, et celle qui résulterait de la rupture des parois. Celle-ci offre un phénomène de recul très curieux. Dès que le gaz s'est ouvert une issue, sa force motrice exerce une réaction, et lance le réservoir comme le fusil à vent lance la balle. On conçoit qu'il doit être fort difficile de retenir un gaz sous une pression aussi énorme que trente atmosphères. On y parvient cependant ; et, ce qui est peut-être encore plus difficile, on parvient, par un mécanisme ingénieux, à en régler la dépense et à n'en laisser sortir que la proportion juste qui est nécessaire à l'éclairage.

CHAPITRE VII.

DE L'ÉQUILIBRE DES CORPS FLOTTANS ET DES CORPS PLONGÉS DANS LES FLUIDES.

94. On voit des corps pesans qui se meuvent en sens contraire de la pesanteur : le liège, le bois, et beaucoup d'autres corps remontent quand ils sont plongés dans l'eau ; le fer remonte de la même manière, quand il est plongé dans le mercure ; la fumée s'élève dans l'air, les nuages restent suspendus dans l'atmosphère, à peu près comme les vaisseaux restent flottans à la surface des eaux. Les fluides paraissent avoir une puissance particulière pour rejeter les corps qu'ils enveloppent de toutes parts, et pour soutenir ceux qui reposent sur leurs

surfaces. Tous ces phénomènes, et même ceux de l'aérostatique et de l'ascension des ballons, dépendent d'un seul principe, que l'on appelle le principe d'Archimède. C'est en effet Archimède qui en est l'inventeur, et c'est à l'occasion de cette découverte que l'on rapporte de lui ce trait d'enthousiasme : il fut, dit-on, saisi d'une si grande joie qu'il sortit du bain, et qu'il parcourut les rues de Syracuse en s'écriant : *Je l'ai trouvé ! je l'ai trouvé !*

95. *Principe d'Archimède.* — Ce principe général peut être énoncé de la manière suivante : un corps

plongé dans un fluide y perd une partie de son poids égale au poids du fluide qu'il déplace ; que le fluide soit un liquide ou un gas, la proposition est également vraie.

Pour prendre une première idée du principe d'Archimède, concevons un grand vase rempli d'eau, et, dans l'intérieur de l'eau, un cube dont les faces supérieure et inférieure soient horizontales (Fig. 116). Il est évident, d'après les principes d'hydrostatique : 1° que les pressions latérales sont égales et contraires, et qu'elles se détruisent, l'une l'autre ; 2° que la face supérieure supporte de haut en bas une pression égale au poids de la colonne liquide qui repose sur elle ; 3° que la face inférieure supporte de bas en haut une pression égale au poids de la colonne liquide qui reposerait sur elle, si le cube était lui-même de l'eau. Cette pression l'emporte sur la première, de tout le poids de la colonne liquide que déplace le cube ; donc le cube est repoussé en haut avec une force égale à cet excès de pression ; donc enfin il perd une partie de son poids égale au poids du volume liquide qu'il déplace. La pression de bas en haut est ce que l'on appelle la *poussée du fluide*. Ainsi, un corps plongé est soumis à deux forces contraires : à son poids, qui tend à le faire descendre, et à la poussée du fluide, qui tend à le faire remonter. Si ces deux forces sont égales, le corps reste en équilibre ; il a perdu tout son poids. Si la poussée du fluide est la plus grande, le corps est repoussé jusqu'à la surface ; enfin, si elle est la plus faible, le corps tombe au fond du vase. On pourrait facilement, par quelques considérations mécaniques, généraliser cette proposition, et l'étendre aux corps de forme quelconque ; mais on peut aussi la démontrer directement par les expériences de la *balance hydrostatique*. Cet appareil est une balance ordinaire, au moyen de laquelle on peut peser les corps, d'abord en les laissant dans l'air, et ensuite en les plongeant dans un liquide. C (Fig. 115) est un cylindre creux en cuivre, dont le cylindre massif P peut remplir exactement la capacité. On les met ensemble dans l'un des bassins de la balance, et dans l'autre bassin l'on met des poids pour établir l'équilibre. Cela fait, on met la balance au repos ; on attache le cylindre P par un fil très fin, on le suspend au-dessous du bassin pour la faire plonger dans l'eau, comme il est représenté dans la figure 115, et l'on trouve qu'il a perdu de son poids, car dans cette seconde pesée la balance est loin d'être en équilibre. Alors, si on verse de l'eau dans le cylindre C, de manière à le remplir exactement, l'équilibre est rétabli ; donc, en plongeant dans l'eau, le cylindre P perd une partie de son poids égale au poids du liquide qu'il déplace.

Voici une autre démonstration du principe d'Archimède, qui est tout-à-fait indépendante de la forme du corps plongé.

Dans l'intérieur de la masse fluide concevons un volume quelconque, une sphère, par exemple, qui

ait un mètre de rayon. Imaginons que les molécules d'eau, qui sont actuellement comprises dans ce volume, soient congelées pour un moment, c'est-à-dire qu'elles forment une sphère solide au lieu d'une sphère liquide ; mais que dans l'acte de la congélation elles ne soient ni éloignées, ni rapprochées l'une de l'autre, et qu'elles conservent exactement leurs positions et leurs distances. Il est évident que la sphère solide restera suspendue et en repos, comme faisait la sphère liquide ; car l'adhérence que nous venons d'établir entre les diverses molécules ne peut ni les soutenir ni les faire tomber ; elle ne change rien aux pressions ni à la pesanteur. Cette sphère solide et pesante a donc perdu son poids, puisqu'elle ne tombe pas, et elle l'a perdu parce qu'elle est environnée d'un fluide qui la presse de toutes parts. Donc, de l'ensemble des pressions inégales qui s'exercent en tous les points de sa surface, résulte une force unique, agissant de bas en haut, et précisément égale au poids de la sphère entière ; ce raisonnement s'applique à un corps de forme quelconque.

Or, quelle que soit la forme du corps qui se congèle, comme nous le supposons ; une fois qu'il est congelé, on pourrait le tourner d'une manière quelconque autour de son centre de gravité, et dans toutes les positions il resterait en équilibre. Donc la force de bas en haut, ou la *poussée du fluide*, est une force qui a son point d'application au centre de gravité du fluide congelé ; ce point s'appelle le *centre de pression*.

Si, au lieu de la substance fluide elle-même que nous supposons congelée, nous imaginons dans l'intérieur du fluide un corps étranger de substance quelconque, de liège, de marbre ou de fer, il est évident qu'il supportera de la part du fluide environnant les mêmes pressions qu'une masse congelée qui aurait la même forme que lui. Donc la poussée du fluide et le centre de pression ne dépendent que de la quantité et de la forme du liquide déplacé, sans dépendre en aucune manière de la nature de la substance qui déplace le liquide.

Ainsi, un corps plongé dans un fluide est toujours soumis à deux forces, dont nous connaissons maintenant les grandeurs, les directions et les points d'application : la première de ces forces est le poids du corps, qui agit de haut en bas, et qui est appliqué au centre de gravité de sa masse ; la seconde est la poussée du fluide, qui agit de bas en haut, et qui est appliquée au centre de gravité du fluide déplacé : de là résultent des conditions d'équilibre et des conditions de stabilité ou d'instabilité, que nous allons déterminer.

96. — *Conditions d'équilibre des corps plongés.* — Pour qu'un corps soit en équilibre au milieu d'un fluide, il faut en général que deux conditions soient remplies, 1° que le poids du corps soit égal au poids du fluide déplacé ; 2° que le centre de gravité du corps et celui du fluide déplacé se trouvent sur une même verticale. Ces conditions se déduisent de ce

qui précède; mais nous pouvons les rendre encore plus sensibles par un exemple. LSPS' (Fig. 117) est une sphère, composée de deux parties; l'une, SLS', qui est de liège, et l'autre, SP'S', qui est de plomb. Son centre de gravité est en g , et son poids est précisément égal au poids de l'eau qu'elle peut déplacer. Si on l'ajuste dans l'eau de manière que la section SS' soit verticale (Fig. 118), elle sera soumise à deux forces parallèles, égales et contraires, qui formeront un couple, savoir, à son poids gV et à la poussée du fluide eF ; et l'équilibre n'aura lieu que quand le couple sera déployé comme dans la figure 117, ou replié sur lui-même comme dans la figure 119; dans le premier cas l'équilibre est stable, et il est instable dans le second.

Quand le corps est homogène, son centre de gravité coïncide avec le centre de pression, et la première condition d'équilibre est alors la seule nécessaire. On peut même l'exprimer autrement en disant que le corps et le fluide qui l'entoure doivent avoir la même densité. Une boule de cire reste suspendue au milieu de l'eau; elle tombe dans l'alcool, et elle nage sur le mercure, parce que sa densité est à peu près égale à celle de l'eau, plus grande que celle de l'alcool, et beaucoup moindre que celle du mercure.

Les poissons paraissent être en équilibre dans l'eau où ils vivent, car ils peuvent s'y tenir en repos sans être entraînés par leur poids ni rejetés par la poussée du fluide. Ainsi un poisson pèse précisément autant que l'eau qu'il déplace, il pèse un kilogramme s'il déplace un litre, et mille kilogrammes s'il déplace mille litres ou un mètre cube. Une baleine de 20 mètres de long déplace à peu près 500 mètres cubes, et pèse en conséquence 500 mille kilogrammes; et même un peu plus, à cause que l'eau de mer est un peu plus pesante que l'eau douce.

S'il est nécessaire que les poissons soient en équilibre pour n'être pas condamnés à se soutenir par un mouvement continu au-dessus des profondeurs de la mer, il est nécessaire aussi que leur équilibre ne soit ni instable, ni indifférent; et cette condition est remplie par un organe particulier qui sert aussi à d'autres usages; car dans l'organisation des êtres il n'y a pas une pièce qui n'ait qu'une seule fin. Cet organe est la vessie nataoire. Il a diverses formes dans les différentes espèces, mais il est toujours placé pour alléger les parties supérieures et pour laisser plus de poids aux parties inférieures. De cette manière le centre de gravité du corps est plus bas que le centre de pression, et la condition de stabilité se trouve remplie. D'après les observations curieuses de M. Biot, le gaz de la vessie nataoire n'est pas de l'air atmosphérique; il est de l'azote presque pur dans les individus qui vivent près de la surface; et il se compose de près de 0,9 d'oxygène et de 0,1 d'azote, dans ceux qui vivent à des profondeurs de 1000 à 1200 mètres. A 8 ou 1000 mètres de profondeur, ces gaz seraient aussi denses que l'eau, et les vessies nataoires deviendraient inutiles pour l'équilibre.

Il paraît que les poissons se sortent aussi de leur vessie nataoire pour exécuter des mouvements de haut en bas ou de bas en haut, qu'ils n'exécuteraient que difficilement au moyen de leurs nageoires. Il suffit pour cela qu'ils puissent la resserer ou la gonfler à volonté: dans le premier cas, leur poids restant le même et leur volume devenant moindre, ils sont plus denses que l'eau, et ils tombent; au contraire, dans le second cas, ils montent comme du liège.

Cependant ce phénomène n'est pas aussi simple qu'on l'imagine au premier instant. Un poisson au milieu de l'eau ne peut pas se gonfler comme un mammifère qui retient son haleine; il ne trouve pas de l'air à prendre ou à rejeter; c'est avec la même quantité de gaz qu'il doit opérer ces mouvements. Il faut donc que, par une action volontaire, le gaz soit sans cesse plus comprimé qu'il ne le serait par le fluide environnant, et qu'un peu plus ou un peu moins d'énergie dans cette action comprimante lui donne successivement un moindre ou un plus grand volume. Cet effet est rendu sensible par l'appareil de la figure 114, qui s'appelle un ludion. Le ludion L monte ou descend, suivant que l'on soulève en que l'on presse la membrane MM' qui ferme le vase.

Dans les poissons que l'on pêche à une profondeur de mille mètres, le gaz de la vessie nataoire est sous une pression d'eau équivalente à cent atmosphères; arrivé à la surface, il tend à prendre un volume cent fois plus grand; aussi observe-t-on que tout l'effort musculaire ne suffit plus pour le retenir; il s'échappe en refoulant tous les organes voisins, et surtout la membrane de l'estomac, qui est alors tellement tendue et dilatée, qu'elle vient former au dehors de la guele une espèce de ballon fort singulier. On peut juger par là que les régions de la mer ont leurs peuples différents, non seulement suivant les climats, mais encore suivant les profondeurs.

97. *Conditions d'équilibre des corps flottans.* — Il y a deux conditions d'équilibre pour les corps flottans comme pour les corps plongés, et ces conditions sont les mêmes; seulement la condition de stabilité est différente. Un vaisseau, par exemple, qui pèse un million de kilogrammes, n'est en équilibre que quand il déplace mille mètres cubes d'eau, qui pèsent comme lui un million de kilogrammes, et quand son centre de gravité et le centre de pression de l'eau se trouvent dans la même verticale. Mais il n'est point nécessaire que le centre de gravité se trouve au-dessous du centre de pression; il suffit seulement qu'il se trouve au-dessous d'un autre point que l'on appelle le métacentre, et dont la détermination nous entraînerait un peu trop loin. La position du métacentre dépend de la forme du vaisseau; celle du centre de gravité dépend de la distribution de la charge, et c'est de leur distance relative que dépend la rapidité des oscillations. C'est pour cette raison,

et pour beaucoup d'autres encore, que, dans le chargement des vaisseaux, il y a un art particulier à distribuer convenablement les poids.

98. *Des aérostats.* — Le principe d'Archimède est vrai pour les gaz comme pour les liquides. Les corps plongés dans les gaz y perdent une partie de leur poids égale au poids du volume de gaz qu'ils déplacent. Si l'air atmosphérique était très pesant, s'il pesait, par exemple, deux ou trois fois autant que l'eau, la plupart des corps terrestres seraient soulevés par la poussée de ce fluide; et, nous-mêmes, nous serions emportés dans l'air comme le liège est emporté dans l'eau; nous ne pourrions être en équilibre que quand nous serions arrivés à une hauteur beaucoup plus grande que la hauteur des nuages. Mais l'air est si léger, il fait perdre aux corps si peu de leur poids, qu'il fallait une grande hardiesse de génie pour concevoir la possibilité de s'élever dans l'atmosphère, de s'y soutenir en équilibre, et d'y voguer librement comme on vogue sur la mer.

C'est aux frères Montgolfier que nous devons cette merveilleuse découverte. Ils avaient annoncé qu'une grande machine de leur invention serait capable de parcourir l'atmosphère : l'expérience en fut tentée à Annonay le 5 juin 1783, en présence des états-généraux et d'un concours immense de peuple; c'est alors que l'on vit en effet un spectacle nouveau sur la terre, et bien digne d'exciter l'enthousiasme : un globe immense qui s'élevait majestueusement dans les airs et qui semblait s'y soutenir par quelque puissance invisible. Cette espèce de prodige est cependant bien facile à comprendre. La *montgolfière*, car c'est ainsi que l'on appelle les appareils de cette nature, la *montgolfière* se compose d'un globe en papier vernis ou en taffetas, qui porte à sa partie inférieure une ouverture de quelques pieds carrés. Au dessous de cette ouverture, et à quelque distance, est suspendu un panier léger, en fil de métal, contenant un corps combustible, soit de la paille hachée, soit de la laine ou du papier. Ce combustible étant enflammé, l'air chaud qu'il produit monte de lui-même, pénètre dans le globe, et en remplit bientôt toute la capacité. A volume égal, l'air chaud pèse moins que l'air froid; ainsi le poids du globe est moindre que le poids de l'air qu'il déplace, et il doit s'élever, par l'excès d'énergie de la poussée du fluide : il s'élève, emportant avec lui le combustible enflammé qui produit sa puissance ascensionnelle, et, pour qu'il s'arrête, il faut qu'il arrive dans des couches d'air assez raréfiées pour que la différence des poids, de l'air froid déplacé et de l'air chaud intérieur, soit justement égale au poids de l'enveloppe, du panier et du combustible qu'il contient.

Un physicien célèbre, dont nous déplorons la perte récente, Charles, eut l'heureuse idée de remplacer l'air chaud par le gaz inflammable, que l'on appelle aujourd'hui *l'hydrogène*, dont Caven-

dish avait fait connaître l'extrême légèreté dès l'année 1766. L'hydrogène est plus de quatorze fois plus léger que l'air, car sa densité est 0,0688, en prenant celle de l'air pour unité. Un centimètre cube d'air pèse 0^{rs}, 001299075, et 1000^{ms} c. pèsent 1299^{ms}, 075, tandis que 1000^{ms} c. d'hydrogène ne pèsent que 89^{ms}, 376. La différence est 1209,699. Ainsi un globe de 1000 mètres cubes, rempli d'hydrogène, peut enlever un poids de 1209^{ms}, 699. Un globe de 500 mètres cubes ne pourrait enlever que 604^{ms}, 849. C'est un *ballon* de cette grandeur que Charles fit construire; et, pour montrer la confiance que devait inspirer sa découverte, il entreprit, avec Robert, ce fameux voyage dans lequel il fut porté en quelques minutes à la hauteur de quatre ou cinq cents toises, et parcourut, dans cette région de l'atmosphère, plus de neuf lieues dans l'espace de deux heures. C'est du milieu des Tuileries que Charles fit son ascension; toute la population de Paris était en mouvement; les places publiques, les sommets des édifices, et tous les lieux élevés étaient couverts de spectateurs : un coup de canon fut le signal du départ, et bientôt on vit monter le ballon, comme un météore qui s'élève sur l'horizon; au plus haut des airs, on distinguait encore les banderoles flottantes, éclairées par le soleil, et les navigateurs tranquilles qui saluaient la terre. Jamais une expérience de physique n'excita tant d'admiration et un tel concert d'applaudissements.

Charles ne pouvait manquer d'avoir des imitateurs, et il en eut en effet dans tous les pays savans. Mais entre tous les voyages aérostatiques qui furent entrepris pour des recherches scientifiques, on distingue ceux qui furent exécutés en France, en 1804, par MM. Gay-Lussac et Biot. Dans une première ascension, ces deux physiciens, parvenus à la hauteur de 4000 mètres, firent des expériences importantes sur l'intensité magnétique de la terre, sur l'électricité de l'air et sur la température de ces hautes régions. Dans une seconde ascension, M. Gay-Lussac, seul, s'éleva à la hauteur de 7000 mètres, la plus grande à laquelle l'homme soit jamais parvenu. MM. de Humboldt et Bonpland se sont élevés à 6100 mètres sur le Chimborazo au-dessus du volcan de Cotopaxi. A cette grande hauteur on éprouve un froid très vif, le thermomètre de M. Gay-Lussac descendit à 10° au-dessous de zéro, tandis qu'à la surface de la terre il marquait 30°. La sécheresse de l'air est si grande et les corps hygrométriques perdent si rapidement leur humidité, qu'on les voit se distordre et se tourmenter dans tous les sens. Le ciel paraît d'un bleu très foncé et mêlé d'une teinte noire. Suspendu au milieu de ces espaces, dans un air si raréfié, à une si grande distance de la terre et de tous les corps résistans, aucun bruit ne vient frapper l'oreille, aucun objet ne se présente à la vue, et l'on éprouve alors un sentiment de solitude que M. Gay-Lussac seul peut décrire. Après une navigation de six heu-

res, dans laquelle il avait parcouru plus de trente lieues en ligne horizontale, M. Gay-Lussac descendit lentement et aborda à la terre dans les envi-

rons de Rouen. Nous citerons en leur lieu les résultats dont il a enrichi la science par ce mémorable voyage.

CHAPITRE VIII.

PRINCIPES DE L'HYDRODYNAMIQUE ET DE L'HYDRAULIQUE.

99. L'hydrodynamique a pour objet de déterminer les principes du mouvement des fluides; l'hydraulique est l'application de ces principes à l'art de conduire les eaux et de les faire servir à mouvoir les machines.

100. La question du mouvement des fluides est l'une des plus importantes de la mécanique rationnelle; mais aussi elle est une des plus compliquées et des plus difficiles. Une masse fluide étant en repos, il ne faut, pour la mettre en agitation dans toute son étendue, qu'un léger dérangement dans une seule de ses molécules; et les mouvements qui en résultent sont modifiés par tant de causes, soit dans leurs vitesses, soit dans leurs directions, qu'il est à peine possible de concevoir la variété et la complication des phénomènes auxquels ils peuvent donner naissance. Cependant nous possédons sur ce sujet quelques lois fondamentales, déterminées par la théorie, et une foule d'expériences qui, sans être soumises au calcul, présentent de très utiles applications dans les arts.

101. *De l'écoulement des liquides par les orifices en minces parois.* — Les parois des vases qui contiennent des liquides supportent en général deux pressions (Fig. 124) : l'une, qui s'exerce de dedans en dehors, et qui repousse la paroi; l'autre, qui s'exerce de dehors en dedans, et qui tend à l'enfoncer. La première résulte des pressions de la colonne liquide qui s'élève au-dessus du point de la paroi que l'on considère, et du poids que cette colonne elle-même peut supporter à son sommet; la seconde est la pression atmosphérique, ou en général la pression du milieu qui enveloppe le vase. Lorsqu'on perce une ouverture, soit dans le fond, soit dans la paroi latérale, il y a une condition pour que le liquide s'écoule : c'est que la pression intérieure, qui tend à produire l'écoulement, soit plus grande que la pression extérieure, qui tend à l'empêcher. La nécessité de cette condition est évidente d'elle-même; mais elle peut aussi se montrer par l'expérience. Une éprouvette OR (Fig. 140) est remplie d'eau, on en recouvre l'ouverture d'un petit disque de papier joseph; on la retourne, et la colonne liquide reste suspendue : l'écoulement est impossible, à moins que la hauteur de l'éprouvette

ne soit de plus de 32 pieds; car à l'ouverture, la pression de haut en bas, qui est due au poids du liquide, est moindre que la pression de bas en haut, qui est due à l'atmosphère. Si l'éprouvette était remplie de mercure, il suffirait de lui donner un peu plus de 28 pouces de hauteur, pour que le liquide pût s'écouler. En faisant cette expérience avec un tube dont l'ouverture est très étroite, on peut supprimer le disque de papier joseph, ou tout autre obturateur analogue; mais si l'ouverture a seulement deux ou trois millimètres de diamètre, l'obturateur devient indispensable. La pression de l'air s'exerçant immédiatement sur la surface mobile du liquide, en refoule toutes les parties avec plus ou moins de force; et quand cette surface a quelque étendue, elle est déformée et enfoncée par l'air, qui s'ouvre un passage pour gagner le sommet du tube. On dit alors que la colonne liquide est *divisée*.

L'étendue nécessaire pour produire ce phénomène dépend de l'intensité de la pression, de la nature du liquide, et ainsi de la nature des parois; mais en général les colonnes plus étroites que 1 millimètre ne se divisent jamais. Nous considérerons toujours, dans ce qui va suivre, l'écoulement résultant d'un excès de pression, et non pas l'écoulement irrégulier qui se produit par la division de la colonne liquide.

102. Pour déterminer les lois mathématiques de l'écoulement des fluides, on admet, en général, l'hypothèse du parallélisme des tranches. On conçoit un orifice en mince paroi (Fig. 125), horizontal ou latéral, mais qui soit très petit par rapport aux dimensions du vase; et l'on admet que, pendant l'écoulement, toutes les molécules liquides qui composent une tranche horizontale très mince sont animées de la même vitesse; qu'elles descendent ensemble, sans se quitter, se moulant en quelque sorte sur les diverses sections du vase pour former une tranche plus mince ou plus épaisse, suivant que la section où elles passent est plus large ou plus étroite. D'après cette hypothèse on calcule la vitesse que doivent prendre les molécules en passant par l'orifice. M. Cauchy admet l'hypothèse de la permanence des filets fluides, il

suppose que, la régularité de l'écoulement étant établie, toutes les molécules qui partent du même point du niveau doivent décrire la même courbe pour arriver à l'orifice, et qu'en passant aux mêmes points elles ont toujours la même vitesse. Dans tous les cas, le niveau supérieur étant variable, la pression qui s'exerce à l'orifice est elle-même variable, et produit des vitesses différentes. L'écoulement le plus simple que l'on puisse considérer est celui qui s'établit sous une pression constante.

103. *Divers moyens de produire une pression constante.* — Nous indiquerons seulement trois moyens généraux de produire des pressions constantes : 1^o par le *trap plein*, 2^o par le *flotteur de M. de Prony*, 3^o par le *vase de Mariotte*.

104. Le *trap plein* peut s'obtenir de diverses manières; la plus simple et la plus exacte paraît être la suivante : R (Fig. 120) est un réservoir, *s* une soupape qui se lève plus ou moins, *t* un tube, *c* et *c'* une caisse, et *a* l'ouverture par laquelle le liquide s'écoule. On donne de l'eau par la soupape *s*, autant qu'il s'en écoule par l'ouverture *a*. Le niveau se maintient exactement à la hauteur *na'*; le tube *t* et la caisse *c* et *c'* sont destinés à empêcher l'agitation qui pourrait produire l'eau par sa chute : car les plus faibles mouvemens, même à la surface supérieure, peuvent avoir une influence sur la dépense.

105. *Flotteur de M. de Prony.* — ABCD (Fig. 129 et 130) est une grande cuve rectangulaire divisée en trois compartimens C₁, C₂, C₃ par les deux petites cloisons *ce'*; le niveau de l'eau passe au-dessus de ces cloisons; F et F' sont les deux vases composant le flotteur; ils plongent chacun dans l'un des compartimens extrêmes, et servent à faire passer l'eau dans le compartiment moyen qui fournit à l'écoulement; H est une grande plaque de métal dans laquelle s'ajustent les orifices et les ajutages par lesquels on veut faire passer le liquide : elle est vue de face figure 129, et de profil figure 130.

Les vases F, F' du flotteur sont en feuilles de cuivre très minces; leurs parois sont renforcées par de petites tringles de fer *t*, qui viennent s'adapter aux grandes tringles T : celles-ci forment un rectangle supporté par le flotteur, et soutenant lui-même un vase V, qui est disposé au-dessous de la cuve, et un entonnoir *er* destiné à conduire dans le vase les produits de l'écoulement.

L'équilibre étant établi, si l'on enlevait 10 kilogrammes d'eau de l'intérieur de la cuve, le niveau baisserait d'une certaine quantité : mais le même poids de 10 kilogrammes placé dans le flotteur, soit en haut dans les vases F, F', soit en bas dans le vase V, ramènerait le niveau exactement au même point; car le flotteur, devenu plus pesant de 10 kilogrammes, déplacerait de plus 10 kilogrammes d'eau, et produirait donc ce s'enfonçant le même effet que si l'on avait remis dans la cuve les 10 kilogrammes d'eau que l'on en avait ôtés. Pour avoir le même niveau pendant l'écoulement,

il faut se réduire donc à charger le flotteur à chaque instant d'un poids égal au poids de l'eau qui coule par l'orifice. C'est là précisément ce que fait l'entonnoir *er*, en conduisant dans le vase V toute l'eau qui sort de la cuve. Il est vrai que le liquide qui est en chemin entre l'orifice et l'entonnoir n'exerce pas encore sa pression pour rétablir le niveau; mais il est facile de tenir compte de la différence.

106. *Vase de Mariotte.* — Cet appareil est représenté (Fig. 126, 127 et 128). *t* est un tube, qui peut glisser dans le bouchon de la tubulure *b*, et dont l'extrémité inférieure est successivement ou abaissée au point *p*, au-dessous du niveau *n* de l'ouverture latérale, ou relevée au point *h*, au-dessus du même niveau. L'ouverture latérale est assez étroite pour que la colonne liquide ne puisse pas se diviser. Le tube étant en *p* (Fig. 126), et complètement rempli d'eau ainsi que le flacon, il est clair que le liquide doit s'écouler par l'orifice latéral *o*; car la pression intérieure se compose de la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet du tube et de la pression due au poids de la colonne liquide *sa*, tandis que la pression extérieure n'est que la pression atmosphérique. Le liquide jaillit en effet, et le niveau tombe rapidement dans l'intérieur du tube depuis le point *s* au point *n*; là il s'arrête, et tout écoulement cesse. Le vase reste plein, l'orifice *o* reste ouvert, et cependant pas une goutte de liquide ne s'échappe. Sur toute l'étendue de la couche horizontale *n'a* la pression étant la même qu'au point *n*, c'est-à-dire une pression atmosphérique, il n'y a plus de raison pour que le liquide s'écoule. Sur une autre couche, telle que *c'e*, la pression n'est pas due seulement au poids de la colonne supérieure, mais elle est égale à une pression atmosphérique diminuée de la colonne *f'e'*. Que l'on fasse maintenant glisser le tube pour le remonter jusqu'au point *h* (Fig. 127); à l'instant même l'écoulement recommence, des bulles d'air se forment à l'extrémité inférieure du tube, se gonflent, se détachent, et montent à la file dans la partie supérieure du vase. L'écoulement continue de la sorte, avec une *vitesse constante*, pendant tout le temps que le niveau du liquide descend depuis le sommet du vase jusqu'en *h*; car la pression sur la couche *a'n* se compose alors de la pression atmosphérique qui s'exerce en *h*, et de la pression qui est due au poids de la colonne *ha*; pressions qui restent l'une et l'autre constantes, aussi long-temps que le niveau n'est pas tombé jusqu'en *h*; à partir de cet instant la vitesse d'écoulement diminue de plus en plus jusqu'à devenir tout-à-fait nulle quand le niveau est arrivé au point *a*. Le vase de Mariotte peut être présenté sous une grande variété de formes, soit avec un orifice latéral pour l'écoulement, soit avec un orifice horizontal comme l'indique la figure 128.

107. *Théorème de Toricelli.* — Dans un appareil ou la condition de l'écoulement est remplie, en

l'hypothèse du parallélisme des tranches ou de la permanence des filets peut avoir lieu, et où le niveau est maintenu constant par l'un des moyens que nous venons d'indiquer, la loi de l'écoulement est déterminée par le théorème suivant, que l'on appelle théorème de Toricelli : *Les molécules, en sortant de l'orifice, ont la même vitesse que si elles fussent tombées librement dans le vide, d'une hauteur égale à la hauteur du niveau au-dessus du centre de l'orifice.* Il résulte de cette proposition trois conséquences importantes.

Premièrement. *La vitesse d'écoulement ne dépend que de la profondeur de l'orifice ou-dessous du niveau, et nullement de la nature du liquide* ; car tous les corps en tombant de la même hauteur dans le vide, acquièrent la même vitesse. Ainsi le mercure et l'eau (Fig. 144) prenant la même vitesse, lorsqu'ils s'écoulent par des orifices qui sont à la même profondeur au-dessous du niveau. Cependant le mercure est poussé par une pression bien plus grande que l'eau. La profondeur de l'orifice étant, par exemple, de 32 pieds, l'eau ne serait poussée que par la pression d'une atmosphère, tandis que le mercure serait poussé par une pression de 13 atmosphères et demie.

Secondement. *Pour un même liquide les vitesses d'écoulement sont comme les racines carrées des profondeurs des orifices ou-dessous du niveau* ; car les vitesses des corps pesants sont entre elles comme les racines carrées des hauteurs d'où ils sont tombés. Ainsi dans un vase qui aurait, par exemple, cent pieds de hauteur, si l'en perceait deux orifices, l'un à un pied de profondeur et l'autre sur le fond à cent pieds de profondeur, la vitesse du liquide, sortant par le dernier, serait seulement dix fois plus grande que la vitesse du liquide sortant par le premier. Cependant la seconde pression serait cent fois plus grande que la première.

Troisièmement. Si la pression qui s'exerce au sommet de la colonne liquide était plus grande que la pression extérieure qui s'oppose à l'écoulement, cet excès de pression serait équivalent au poids d'une colonne de même liquide d'une certaine hauteur ; et alors la vitesse des molécules qui s'écoulerait serait la même que si elles fussent tombées du sommet de cette seconde colonne, qu'il faut concevoir comme ajoutée au-dessus de la première. Ce serait le contraire si la pression extérieure était plus grande que la pression qui s'exerce au-dessus du liquide.

108. *Contraction de la veine fluide.* — Avant de vérifier par l'expérience le théorème de Toricelli et les trois autres lois de l'écoulement qui en sont une conséquence, nous devons faire connaître le phénomène curieux de la *Contraction de la veine*. Supposons que le liquide jaillisse d'un vase par un orifice circulaire percé en mince paroi. La veine fluide sera verticale ou parabolique suivant que l'ouverture sera faite au fond du vase ou sur sa paroi latérale : dans les deux cas on sait qu'elle se

moule en quelque sorte sur la forme de l'orifice, et qu'elle s'étend à une assez grande distance avant de se diviser et de s'éparpiller en gouttes. Entre la paroi et le point où elle se divise, la veine fluide prend une surface polie, et une forme permanente ; malgré le mouvement rapide des molécules qui se succèdent incessamment, elle offre l'apparence d'une voûte de cristal qui serait parfaitement immobile. L'orifice ayant, par exemple, un centimètre de diamètre, la section de la veine est d'un centimètre à son origine, mais à quelques millimètres de distance, la section diminue, et elle diminue de plus en plus sans cesser d'être circulaire jusqu'à une certaine limite, où se trouve ce que l'on appelle la *section contractée* ; passé ce point, la section augmente de nouveau jusqu'à l'instant où la veine se divise par l'accélération de la pesanteur et par la présence de l'air. Dans les figures 135, 138, *es* est la section contractée.

L'écoulement qui se fait par de grandes ouvertures présente aussi le phénomène de la contraction de la veine, mais sur une autre échelle et avec d'autres circonstances extrêmement remarquables. Pour en donner une idée, je citerai ici, sur les veines carrées, quelques observations qui sont dues à MM. Poncelet et Lesbros, capitaines de génie ; ces observations sont tirées d'un immense travail qui a été exécuté par ces deux habiles ingénieurs à l'École d'application de Metz, et dans lequel on trouve une foule d'expériences du plus grand intérêt, parce qu'elles sont nouvelles, et parce qu'elles ont été dirigées et décrites avec une précision quine laisse rien à désirer.

Dans l'une de ces expériences, la veine sort par un orifice vertical, percé en mince parois, de forme carrée, ayant 20 centimètres de côté, sous une charge de $1^m,68$, prise au-dessus de la base de l'orifice.

Les résultats en sont représentés dans les figures 131, 132, 133 et 134. La figure 131 est la section de l'orifice, et les figures 132, 133 et 134 représentent les sections de la veine par des plans verticaux parallèles à l'orifice, et pour des distances qui sont respectivement de 20, 30 et 40 centimètres.

La lettre H indique partout la partie supérieure de la veine. En comparant d'abord la figure 131 à la figure 134, l'on reconnaît le phénomène de l'*inversion de la veine*, c'est-à-dire que vis-à-vis les angles de l'orifice sont les milieux des côtés de la veine, et réciproquement vis-à-vis les angles de la veine sont les milieux des côtés de l'orifice. Cette inversion n'est pas subite : elle se fait par degrés, comme on peut le voir sur les figures 132 et 133, qui représentent les sections faites à 20 et à 30 centimètres. A une petite distance de l'orifice les angles du carré disparaissent et sont remplacés par de petites facettes sensiblement planes, tandis que les côtés du carré s'infléchissent en dedans et paraissent un peu concaves lorsqu'on les regarde du de-

hors. A mesure que la veine s'éloigne de l'orifice, les facettes s'élargissent de plus en plus et se creusent à leur tour, tandis que les côtés diminuent; de telle sorte qu'à 20 centimètres de distance (Fig. 132) la section de la veine est octogonale : ses huit côtés sont presque égaux et également inclinés vers le centre; seulement on remarque en B, à la partie inférieure, une irrégularité singulière : c'est une arête saillante de rebroussement vers le milieu du côté. Au-delà de 20 centimètres ces effets continuent dans le même sens; et à 30 centimètres (Fig. 133), les faces correspondantes aux côtés de l'orifice ont disparu complètement, celle d'en haut et celle d'en bas se sont arrondies, tandis que les deux latérales se sont creusées d'une manière assez bizarre. Enfin, à 40 centimètres toutes les arêtes de rebroussement s'effacent, et la section de la veine n'a plus que quatre côtés un peu courbés en dedans et sensiblement égaux. Cette figure se conserve au-delà de 40 centimètres, seulement; les faces se creusent davantage et les pointes deviennent plus saillantes.

Le maximum de contraction, ou plutôt la section contractée, se trouve à 30 centimètres : c'est la section de la figure 133. Sa surface est seulement les 0,56 de celle de l'orifice; c'est-à-dire que pour cette veine le coefficient de contraction est 0,56.

Quand les orifices ne sont pas circulaires, les points de la surface de la veine, qui sont les plus rapprochés de l'axe, et qui forment, à proprement parler, la section contractée, se trouvent en général sur une courbe à double courbure.

Plusieurs physiciens ont essayé de déterminer, soit directement, soit indirectement, le rapport qui existe entre la section contractée et la section de l'orifice, et tous s'accordent à conclure que pour les orifices qui ont seulement quelques centimètres de côté ce rapport est compris entre 0,5 et 0,7; c'est-à-dire qu'à son minimum la section de la veine n'est plus que les 5 dixièmes, ou les 7 dixièmes, ou environ les 2/3 de la surface de l'ouverture. C'est ce rapport que l'on appelle le *coefficient de contraction*.

La distance de la section contractée à la face intérieure de la paroi est, en général, un peu plus grande que le rayon de l'orifice quand l'orifice est petit; mais, pour des ouvertures plus grandes, la section contractée paraît s'éloigner davantage.

Ces résultats sont à peu près indépendants de la forme de l'orifice et de la pression sous laquelle le liquide s'écoule. Seulement, pour des orifices dont le diamètre est moindre qu'un centimètre, la contraction est moindre que 0,7; ce qui tient sans doute à ce que l'épaisseur des parois devient alors sensible, et produit un effet analogue à l'effet des ajutages, dont nous parlerons plus loin.

Lorsque la pression qui s'exerce au-dessus d'un orifice horizontal est très faible, il se fait une contraction d'une autre espèce (Fig. 139); le liquide remplit encore l'orifice, mais il glisse des parois

vers le centre pour former un filet qui est quelquefois très petit. C'est ce que M. Haehettes appelle une *veine secondaire*.

La contraction de la veine résulte de la convergence des divers filets fluides qui la composent. Si toutes les molécules se présentaient à l'orifice avec des vitesses parallèles à l'axe de la veine, il n'y aurait point de contraction, parce qu'il n'y aurait point de raison pour qu'elles fussent déviées de la ligne directe de leur mouvement; mais le liquide, appelé par l'écoulement, et poussé par la pression, se précipitant vers l'orifice dans toutes les directions possibles, il faut bien que la convergence de ces vitesses se manifeste au dehors par un rétrécissement. Cette cause de la contraction ne peut être qu'indiquée; le calcul ne saurait y atteindre.

La division de la veine à une certaine distance de l'orifice n'est pas seulement produite par la présence de l'air; elle a lieu dans le vide, et elle résulte de l'accélération due à la pesanteur. Deux molécules qu'on laisserait tomber du même point, à une seconde d'intervalle, seraient, au point de départ, à 15 pieds l'une de l'autre; mais, après trois secondes, elles seraient à 65 pieds de distance, et après une minute, elles seraient à 1785 pieds : c'est là précisément ce qui arrive aux différentes parties du liquide qui composent la veine. Deux molécules se suivent en passant par l'orifice, et après un certain temps, la première prend une avance sensible sur la seconde.

109. *Vérification expérimentale des lois de l'écoulement.* — L'appareil à flotteur de M. de Prony est un des plus commodes que l'on ait employés jusqu'à ce jour, dans les recherches exactes sur les mouvements des fluides. Pour vérifier la première loi, en le théorème de Toricelli, on adapte à la plaque (Fig. 129 et 130) un orifice en mince paroi d'une grandeur connue, d'un centimètre, par exemple; on mesure la hauteur du niveau au-dessus de son centre, et on observe la *dépense* pendant un temps très exactement déterminé. Cette dépense étant connue et évaluée en litres, il est très facile d'en déduire le nombre L des litres qui se sont écoulés en 1^{re}; alors on peut considérer ce volume comme un cylindre qui est passé par l'orifice, à peu près comme un fil passe à la filière, et dont la base est par conséquent la surface S de la veine contractée, tandis que sa longueur est l'espace parcouru en 1^{re}, c'est-à-dire la vitesse V de l'écoulement. D'où l'on déduit :

$$SV = L, \text{ ou } V = \frac{L}{S}$$

C'est la vitesse expérimentale, ou la vitesse effective.

D'une autre part, la vitesse théorique, donnée par le théorème, est :

$$V = \sqrt{2gh}$$

h étant la hauteur du niveau, au-dessus du centre de l'orifice.

C'est de l'égalité de ces deux vitesses que dépend la vérité du théorème de Toricelli. Comme il est très difficile de mesurer directement le diamètre de la veine contractée pour en déduire sa surface S , on trouve en général de petites différences; tantôt la vitesse effective est plus grande que la vitesse théorique, tantôt elle est plus petite; mais, pour les petites orifices, les deux résultats sont si voisins, qu'il suffit d'augmenter ou de diminuer un peu la valeur de S pour les rendre tout-à-fait identiques; c'est même de cette manière que l'on a déterminé la valeur de la contraction de la veine. Ainsi, dans ce cas, le théorème de Toricelli paraît vrai; il donne la vitesse des molécules liquides qui s'écoulent, mais seulement la vitesse dont elles sont animées à l'instant où elles traversent la section contractée; avant et après cet instant elles ont une moindre vitesse, puisque la section de la veine offre une plus grande surface. Pour les grands orifices, MM. Poncelet et Lesbros ayant mesuré avec une grande précision, et la section contractée et la dépense dans un temps donné, il leur a été facile d'en déduire rigoureusement la vitesse effective, et leurs résultats prouvent que, dans ce cas, le théorème de Toricelli ne donne pas exactement la vitesse du liquide dans la section contractée.

Il est facile de voir comment les autres lois de l'écoulement peuvent être vérifiées, au moyen du même appareil, et comment on peut constater aussi que la courbure du jet est une *parabole*, dont l'amplitude augmente avec la vitesse initiale.

110. *Des ajutages, et de leur influence sur l'écoulement.* — On appelle *ajutages* des tuyaux de diverses formes, ou des plaques courbes, percées de diverses manières, qui s'ajustent aux orifices en minces parois, pour donner passage au liquide qui s'écoule.

Le plus simple des ajutages est celui qui a la forme exacte que prend la veine, depuis l'orifice jusqu'à la section contractée. Lorsqu'il est travaillé avec soin et que sa surface intérieure est bien polie, il n'exerce aucune influence sur la dépense.

Une paroi courbe, percée d'un orifice, ne donne pas la même dépense qu'une paroi plane, percée d'un orifice de même grandeur: elle donne une dépense plus grande quand sa concavité est tournée vers l'intérieur (Fig. 136), et une dépense moindre quand elle est tournée vers l'extérieur (Fig. 137).

Dans les *ajutages cylindriques* de même diamètre que les orifices en minces parois auxquels ils sont appliqués, il se produit un phénomène singulier: tantôt la veine fluide reste libre et passe dans l'ajutage sans le toucher, tantôt elle devient adhérente, et l'écoulement se fait à *goutte bée*, c'est-à-dire à plein tuyau. Dans le premier cas, la présence de l'ajutage n'a d'influence ni sur la vitesse ni sur la dépense; il ne peut produire aucun effet, puisqu'il n'a aucun point de contact avec le liquide.

Dans le second cas, l'adhérence qui s'établit entre la surface de la veine et les parois de l'ajutage détermine une augmentation de vitesse et une augmentation de dépense. La dépense du premier cas est à celle du second comme 100 est à 133, pourvu toutefois que le diamètre de l'ajutage soit à peu près le quart de sa longueur. Ce phénomène dépend de plusieurs causes, et surtout de la pression: sous de faibles charges, la veine est toujours adhérente, même pour les ajutages très courts; sous de grandes pressions, la veine reste libre; et sous des pressions intermédiaires on peut à volonté produire l'écoulement à veine libre ou à veine adhérente; il suffit d'un léger obstacle pour établir l'adhérence, et il suffit quelquefois du moindre choc pour que la veine se détache des parois de l'ajutage et coule librement.

Quand l'adhérence est établie, la veine fluide se contracte dans l'ajutage, comme elle ferait à l'air libre (Fig. 121); on peut s'en assurer en faisant l'expérience avec un tube de verre, et l'on peut s'en assurer encore en donnant à l'ajutage la forme elle-même de la veine contractée (Fig. 122); avec ce rétrécissement, la dépense est encore 133, comme elle était auparavant.

Un *ajutage conique* peut donner une dépense encore plus grande que l'ajutage cylindrique: il paraît que l'on obtient la plus grande dépense possible, en prenant deux troncs de cône opposés (Fig. 123), de telle sorte que aa' prenne exactement la forme de la veine, que mn égale trois fois om , et que TT' soit les $17/8$ de aa' . Alors la dépense de l'orifice était représentée par 100, celle de l'ajutage s'élève à peu près à 160.

S'il y a des ajutages qui augmentent la dépense, il est très facile d'en construire aussi qui la diminuent dans un très grand rapport. Tout renflement dans un ajutage conique ou cylindrique produit une diminution de vitesse; les *réflexions*, les *remous*, les chocs des molécules animées de mouvements contraires, produisent une grande complication de phénomènes, et en dernier résultat une grande diminution dans la dépense. Les varices peuvent être assimilées à des renflements de cette espèce, et s'il est difficile d'analyser leur influence complète sur les phénomènes de la vie, il est du moins permis de conclure que, dans tous les cas, elles retardent la vitesse de la circulation.

C'est surtout aux recherches de Bossut, de Duhamel, de Venturi, de M. de Prony et de M. Riche, que nous devons les résultats les plus nouveaux du mouvement des liquides, soit par les orifices en minces parois, soit par les ajutages.

111. *De l'unité de mesure dans la distribution des eaux.* — L'unité de mesure, pour les eaux courantes, est connue sous le nom de *pouce de fontainier* ou *pouce d'eau*. C'est la quantité d'eau qui coule, en une minute, par un orifice circulaire d'un pouce de diamètre, percé dans une paroi

verticale, avec une charge d'eau de sept lignes sur le centre de l'orifice, on d'une ligne au-dessus de son point culminant. Le volume d'eau qui s'écoule dans de telles circonstances est de 14 pintes aînésiennes de Paris, ou 672 pouces cubes par minute; ce qui revient à 19,2^{met. cub.} en 24 heures. Un demi-pouce d'eau est la quantité d'eau qui s'écoule par un orifice d'un demi-pouce de diamètre, dont le centre supporte également une pression de 7 lignes : d'où il résulte qu'en volume ou en poids le demi-pouce est véritablement le quart du ponce; car sous la même pression un orifice d'un diamètre moitié donne une dépense qui n'est que le quart. Une ligne d'eau n'est, par la même raison, que la 14^e partie du ponce, ou 19,2^{met. c.}/144 en 24 heures.

Il résulte de ce que nous avons vu sur les ajutages, qu'un propriétaire auquel on accorde une certaine quantité d'eau, et par conséquent un orifice en mince paroi d'une certaine grandeur, pourrait tirer du même orifice un volume d'eau une fois et demie plus grande; ainsi, dans les concessions, il importe non seulement de régler le diamètre de l'ouverture, mais encore de défluer l'espace d'ajutage que l'on peut employer.

Il paraît qu'à Paris la dépense journalière est d'environ 10 mille mètres cubes; ce qui fait à peu près 15 litres par tête.

112. — *Des jets d'eau.* — Il y a des jets d'eau qui s'élèvent verticalement de bas en haut, et il y en a d'autres qui s'élèvent en gerbes, suivant des paraboles de diverses amplitudes. Les orifices qui donnent naissance aux jets verticaux sont percés dans des parois horizontales, et ceux qui donnent naissance aux jets paraboliques sont percés dans des parois diversement inclinées. Dans tous les cas, la direction du jet est produite par la pesanteur, qui est toujours verticale, et par la pression ou la force impulsive, qui est toujours perpendiculaire à la paroi. D'après le théorème de Toricelli (107), les molécules liquides ayant à l'orifice la même vitesse que si elles fussent tombées d'une hauteur égale à la hauteur du niveau du liquide dans le réservoir, on voit que cette vitesse, dirigée de bas en haut, serait précisément capable de faire remonter toutes les molécules jusqu'à la hauteur de ce niveau, d'où elles sont censées descendues (40). Ainsi, la hauteur du jet vertical serait toujours égale à l'élévation du niveau au-dessus de l'orifice. Mais il y a plusieurs causes qui empêchent les eaux jaillissantes d'atteindre à cette hauteur théorique; elles éprouvent des frottements contre les parois des tuyaux qui les amènent depuis le réservoir jusqu'à l'orifice et contre l'orifice lui-même dont elles rasent les parois avec une grande vitesse; elles éprouvent la résistance de l'air atmosphérique, et enfin les eaux qui retombent du point le plus élevé du jet retombent sur les eaux ascendantes, et leur enlèvent du mouvement. Pour réduire toutes ces résistances à leurs moindres va-

leurs, on a coutume de suivre dans la pratique les règles suivantes :

1^o On donne aux tuyaux de conduite un diamètre qui dépend de leurs longueurs, de la grandeur de l'orifice et de la hauteur du réservoir. Le diamètre pourra être calculé par les formules que nous donnerons tout à l'heure sur les tuyaux de conduite. On s'arrange pour que la vitesse de l'eau dans les tuyaux soit tout au plus de 2 ou 3 décimètres par seconde.

2^o On fait l'orifice égrené et on le perce en mince paroi dans une plaque que l'on appelle la platine. Quand on peut se dispenser de recourber le tuyau, la platine est ajustée vers son extrémité; elle forme une partie de sa paroi latérale supérieure. Quand on est forcé de recourber le tuyau, on le recourbe en haut, en l'arrondissant, et alors la platine en forme l'extrémité. La platine est plane ou courbée en forme de calotte conique, suivant que l'on veut avoir un jet vertical, ou une gerbe à plusieurs jets paraboliques.

Tout ajutage, cylindrique ou conique, donne un jet moins élevé que les orifices en minces parois.

Ces conditions étant remplies, on admet, d'après les expériences de Mariotte, que le jet s'élève à une hauteur de 6 pieds pour une hauteur de réservoir de 5 pieds 1 pouce; et qu'en général, pour avoir la hauteur du réservoir, il faut, à la hauteur H du jet, évaluée en pieds, ajouter autant de poncees qu'il se trouve d'unités dans H/5 élevé au carré. Ainsi un jet de 100 pieds suppose un réservoir de 100 pieds, plus 400 poncees, ou enfin de 133 pieds 4 poncees.

113. *Des tuyaux de conduite.* — La conduite des eaux est un point important d'économie publique et d'économie industrielle; mais au même temps, c'est une question d'hydraulique qui présente de grandes difficultés. Quelques centimètres de plus ou de moins, dans le diamètre des tuyaux qui distribuent les eaux dans une grande ville, correspondent à un capital de plusieurs millions, et il faut remplir la double condition de les faire assez larges, pour qu'ils fournissent toute la quantité d'eau nécessaire, et assez étroits pour qu'ils coûtent le moins possible. Beaucoup d'ingénieurs habiles ont fait sur ce sujet des recherches théoriques et expérimentales, et les travaux récents de M. de Prony, de M. Girard et de M. Navier ont jeté un grand jour sur cette branche de l'hydraulique. Nous nous contenterons de rapporter ici les résultats qui peuvent être d'une application plus usuelle et plus immédiate. M. de Prony est parvenu à la formule suivante pour l'écoulement de l'eau dans les tuyaux de fonte, dont se composent les conduites :

$$V = 26,79 \sqrt{\frac{h}{L}}$$

h est le diamètre du tuyau;

L est sa longueur;

u est la hauteur du niveau de l'eau dans le réservoir au-dessus de l'extrémité du tuyau par laquelle l'eau s'écoule. Si cette extrémité était elle-même submergée, il faudrait retrancher sa profondeur au-dessous de l'eau.

U est la vitesse de l'eau à l'orifice ou dans toute la longueur du tuyau, ce qui est la même chose; car on suppose qu'il a partout le même diamètre.

Pour toutes ces grandeurs, l'unité de mesure est le mètre.

Pour appliquer cette formule, il faut que — ne

dépasse pas 1/100, c'est-à-dire que la longueur du tuyau soit au moins de cent fois son diamètre; et il faut encore que le diamètre ne soit pas lui-même très petit : s'il n'avait que quelques millimètres ou même 1 centimètre, la formule donnerait sans doute

des résultats trop forts. Dans ces limites, elle a été vérifiée par M. de Prony avec tant de soin que l'on peut la regarder comme très exacte; elle s'accorde avec l'expérience, pour des conduites qui ont jusqu'à 2280 mètres de longueur. Il nous a semblé nécessaire de former, au moyen de cette formule, un tableau contenant les résultats dont on peut avoir le plus souvent besoin dans la pratique.

La première colonne verticale contient les valeurs de u ou les pressions qui s'exercent sur l'orifice d'écoulement; elles vont en croissant de 2 décimètres en 2 décimètres, depuis 2 décimètres jusqu'à 10 mètres.

La première colonne horizontale contient les valeurs de — ou les rapports du diamètre du tuyau à sa longueur :

TABLE DES VITESSES DE L'EAU QUI S'ÉCOULE DANS LES TUYAUX.

	0,001	0,0015	0,002	0,0025	0,003	0,0035	0,004	0,0045	0,005	0,0055	0,006	0,0065	0,007	0,0075	0,008	0,0085	0,009	0,0095	0,01
0,2	0,379	0,464	0,538	0,599	0,650	0,700	0,736	0,800	0,857	0,909	0,958	1,005	1,052	1,098	1,145	1,192	1,239	1,285	1,332
0,3	0,536	0,650	0,754	0,837	0,918	0,992	1,072	1,137	1,198	1,256	1,312	1,368	1,424	1,480	1,536	1,592	1,648	1,704	1,760
0,4	0,636	0,769	0,894	0,998	1,092	1,178	1,252	1,309	1,367	1,425	1,483	1,541	1,599	1,657	1,715	1,773	1,831	1,889	1,947
0,5	0,718	0,871	1,007	1,108	1,192	1,268	1,332	1,389	1,447	1,505	1,563	1,621	1,679	1,737	1,795	1,853	1,911	1,969	2,027
0,6	0,837	1,007	1,157	1,258	1,342	1,418	1,482	1,539	1,597	1,655	1,713	1,771	1,829	1,887	1,945	2,003	2,061	2,119	2,177
0,7	0,958	1,137	1,297	1,398	1,474	1,548	1,612	1,669	1,727	1,785	1,843	1,901	1,959	2,017	2,075	2,133	2,191	2,249	2,307
0,8	1,069	1,258	1,418	1,519	1,595	1,669	1,733	1,791	1,849	1,907	1,965	2,023	2,081	2,139	2,197	2,255	2,313	2,371	2,429
0,9	1,172	1,371	1,531	1,632	1,708	1,782	1,846	1,904	1,962	2,020	2,078	2,136	2,194	2,252	2,310	2,368	2,426	2,484	2,542
1,0	1,275	1,484	1,644	1,745	1,821	1,895	1,959	2,017	2,075	2,133	2,191	2,249	2,307	2,365	2,423	2,481	2,539	2,597	2,655
1,1	1,378	1,587	1,747	1,848	1,924	1,998	2,062	2,120	2,178	2,236	2,294	2,352	2,410	2,468	2,526	2,584	2,642	2,700	2,758
1,2	1,481	1,690	1,850	1,951	2,027	2,101	2,165	2,223	2,281	2,339	2,397	2,455	2,513	2,571	2,629	2,687	2,745	2,803	2,861
1,3	1,584	1,793	1,953	2,054	2,130	2,204	2,268	2,326	2,384	2,442	2,500	2,558	2,616	2,674	2,732	2,790	2,848	2,906	2,964
1,4	1,687	1,896	2,056	2,157	2,233	2,307	2,371	2,429	2,487	2,545	2,603	2,661	2,719	2,777	2,835	2,893	2,951	3,009	3,067
1,5	1,790	1,999	2,159	2,260	2,336	2,410	2,474	2,532	2,590	2,648	2,706	2,764	2,822	2,880	2,938	2,996	3,054	3,112	3,170
1,6	1,893	2,102	2,262	2,363	2,439	2,513	2,577	2,635	2,693	2,751	2,809	2,867	2,925	2,983	3,041	3,099	3,157	3,215	3,273
1,7	1,996	2,205	2,365	2,466	2,542	2,616	2,680	2,738	2,796	2,854	2,912	2,970	3,028	3,086	3,144	3,202	3,260	3,318	3,376
1,8	2,099	2,308	2,468	2,569	2,645	2,719	2,783	2,841	2,899	2,957	3,015	3,073	3,131	3,189	3,247	3,305	3,363	3,421	3,479
1,9	2,202	2,411	2,571	2,672	2,748	2,822	2,886	2,944	2,999	3,057	3,115	3,173	3,231	3,289	3,347	3,405	3,463	3,521	3,579
2,0	2,305	2,514	2,674	2,775	2,851	2,925	2,989	3,047	3,105	3,163	3,221	3,279	3,337	3,395	3,453	3,511	3,569	3,627	3,685
2,1	2,408	2,617	2,777	2,878	2,954	3,028	3,092	3,150	3,208	3,266	3,324	3,382	3,440	3,498	3,556	3,614	3,672	3,730	3,788
2,2	2,511	2,720	2,880	2,981	3,057	3,131	3,195	3,253	3,311	3,369	3,427	3,485	3,543	3,601	3,659	3,717	3,775	3,833	3,891
2,3	2,614	2,823	2,983	3,084	3,160	3,234	3,298	3,356	3,414	3,472	3,530	3,588	3,646	3,704	3,762	3,820	3,878	3,936	3,994
2,4	2,717	2,926	3,086	3,187	3,263	3,337	3,401	3,459	3,517	3,575	3,633	3,691	3,749	3,807	3,865	3,923	3,981	4,039	4,097
2,5	2,820	3,029	3,189	3,290	3,366	3,440	3,504	3,562	3,620	3,678	3,736	3,794	3,852	3,910	3,968	4,026	4,084	4,142	4,200
2,6	2,923	3,132	3,292	3,393	3,469	3,543	3,607	3,665	3,723	3,781	3,839	3,897	3,955	4,013	4,071	4,129	4,187	4,245	4,303
2,7	3,026	3,235	3,395	3,496	3,572	3,646	3,710	3,768	3,826	3,884	3,942	4,000	4,058	4,116	4,174	4,232	4,290	4,348	4,406
2,8	3,129	3,338	3,498	3,599	3,675	3,749	3,813	3,871	3,929	3,987	4,045	4,103	4,161	4,219	4,277	4,335	4,393	4,451	4,509
2,9	3,232	3,441	3,601	3,702	3,778	3,852	3,916	3,974	4,032	4,090	4,148	4,206	4,264	4,322	4,380	4,438	4,496	4,554	4,612
3,0	3,335	3,544	3,704	3,805	3,881	3,955	4,019	4,077	4,135	4,193	4,251	4,309	4,367	4,425	4,483	4,541	4,599	4,657	4,715
3,1	3,438	3,647	3,807	3,908	3,984	4,058	4,122	4,180	4,238	4,296	4,354	4,412	4,470	4,528	4,586	4,644	4,702	4,760	4,818
3,2	3,541	3,750	3,910	4,011	4,087	4,161	4,225	4,283	4,341	4,399	4,457	4,515	4,573	4,631	4,689	4,747	4,805	4,863	4,921
3,3	3,644	3,853	4,013	4,114	4,190	4,264	4,328	4,386	4,444	4,502	4,560	4,618	4,676	4,734	4,792	4,850	4,908	4,966	5,024
3,4	3,747	3,956	4,116	4,217	4,293	4,367	4,431	4,489	4,547	4,605	4,663	4,721	4,779	4,837	4,895	4,953	5,011	5,069	5,127
3,5	3,850	4,059	4,219	4,320	4,396	4,470	4,534	4,592	4,650	4,708	4,766	4,824	4,882	4,940	4,998	5,056	5,114	5,172	5,230
3,6	3,953	4,162	4,322	4,423	4,500	4,574	4,638	4,696	4,754	4,812	4,870	4,928	4,986	5,044	5,102	5,160	5,218	5,276	5,334
3,7	4,056	4,265	4,425	4,526	4,603	4,677	4,741	4,800	4,858	4,916	4,974	5,032	5,090	5,148	5,206	5,264	5,322	5,380	5,438
3,8	4,159	4,368	4,528	4,629	4,706	4,780	4,844	4,902	4,960	5,018	5,076	5,134	5,192	5,250	5,308	5,366	5,424	5,482	5,540
3,9	4,262	4,471	4,631	4,732	4,809	4,883	4,947	5,005	5,063	5,121	5,179	5,237	5,295	5,353	5,411	5,469	5,527	5,585	5,643
4,0	4,365	4,574	4,734	4,835	4,912	4,986	5,050	5,108	5,166	5,224	5,282	5,340	5,398	5,456	5,514	5,572	5,630	5,688	5,746
4,1	4,468	4,677	4,837	4,938	5,015	5,089	5,153	5,211	5,269	5,327	5,385	5,443	5,501	5,559	5,617	5,675	5,733	5,791	5,849
4,2	4,571	4,780	4,940	5,041	5,118	5,192	5,256	5,314	5,372	5,430	5,488	5,546	5,604	5,662	5,720	5,778	5,836	5,894	5,952
4,3	4,674	4,883	5,043	5,144	5,221	5,295	5,359	5,417	5,475	5,533	5,591	5,649	5,707	5,765	5,823	5,881	5,939	6,000	6,058
4,4	4,777	4,986	5,146	5,247	5,324	5,398	5,462	5,520	5,578	5,636	5,694	5,752	5,810	5,868	5,926	5,984	6,042	6,100	6,158
4,5	4,880	5,089	5,249	5,350	5,427	5,501	5,565	5,623	5,681	5,739	5,797	5,855	5,913	5,971	6,029	6,087	6,145	6,203	6,261
4,6	4,983	5,192	5,352	5,453	5,530	5,604	5,668	5,726	5,784	5,842	5,899	5,957	6,015	6,073	6,131	6,189	6,247	6,305	6,363
4,7	5,086	5,295	5,455	5,556	5,633	5,707	5,771	5,829	5,887	5,945	6,003	6,061	6,119	6,177	6,235	6,293	6,351	6,409	6,467
4,8	5,189	5,398	5,558	5,659	5,736	5,810	5,874	5,932	5,990	6,048	6,106	6,164	6,222	6,280	6,338	6,396	6,454	6,512	6,570
4,9	5,292	5,501	5,661	5,762	5,839	5,913	5,977	6,035	6,093	6,151	6,209	6,267	6,325	6,383	6,441	6,499	6,557	6,615	6,673
5,0	5,395	5,604	5,764	5,865	5,942	6,016	6,080	6,138	6,196	6,254	6,312	6,370	6,428	6,486	6,544	6,602	6,660	6,718	6,776
5,1	5,498	5,707	5,867	5,968	6,045	6,119	6,183	6,241	6,299	6,357	6,415	6,473	6,531	6,589	6,647	6,705	6,763	6,821	6,879
5,2	5,601	5,810	5,970	6,071	6,148	6,222	6,286	6,344	6,402	6,460	6,518	6,576	6,634	6,692	6,750	6,808	6,866	6,924	6,982
5,3	5,704	5,913	6,073	6,174	6,251	6,325	6,389	6,447	6,505	6,563	6,621	6,679	6,737	6,795	6,853	6,911	6,969	7,027	7,085
5,4	5,807	6,016	6,176	6,277	6,354	6,428	6,492	6,550	6,608	6,666	6,724	6,782	6,840	6,898	6,956	7,014	7,072	7,130	7,188
5,5	5,910	6,119	6,279	6,380	6,457	6,531	6,595	6,653	6,711	6,769	6,827	6,885	6,943	7,001	7,059	7,117	7,175	7,233	7,291
5,6	6,013	6,222	6,382	6,483	6,560	6,634	6,698	6,756	6,814	6,872	6,930	6,988	7,046	7,104	7,162	7,220	7,278	7,336	7,394
5,7	6,116	6,325	6,485	6,586	6,663	6,737	6,801	6,859	6,917	6,975	7,033	7,091	7,149	7,207	7,265	7,323	7,381	7,439	7,497
5,8	6,219	6,428	6,588	6,689	6,766	6,840	6,904	6,962	7,020	7,078	7,136	7,194	7,252	7,310	7,368	7,426	7,484	7,542	7,600
5,9	6,322	6,531	6,691	6,792	6,869	6,943	7,007	7,065	7,123	7,181	7,239	7,297	7,355	7,413	7,471	7,529	7,587	7,645	7,703
6,0	6,425	6,634	6,794	6,895	6,972	7,046	7,110	7,168	7,226	7,284	7,342	7,400	7,458	7,516	7,574	7,632	7,690	7,748	7,806
6,1	6,528	6,737	6,897	6,998	7,075	7,149	7,213	7,271	7,329	7,387	7,445	7,503	7,561	7,619	7,677	7,			

ce rapport va croissant de 5 dix-millièmes en 5 dix-millièmes, depuis 1 millième jusqu'à 1 centième.

Au croisement d'une colonne horizontale et d'une colonne verticale se trouve la valeur de U ou la vitesse d'écoulement correspondante aux nombres qui sont en tête des deux colonnes.

Par exemple, si on veut avoir la vitesse d'écoulement sous une pression de 5,4 mètres par un tuyau dont le diamètre, divisé par la longueur, donne 0,0045, on suivra la colonne horizontale qui commence par 5,4 jusqu'à ce qu'elle coupe la colonne verticale commençant par 0,0045; le nombre 4,176 qui se trouve au croisement indique que, dans ces circonstances, la vitesse d'écoulement est, par seconde, de 4 mètres et 176 millimètres.

Pour des nombres qui ne seraient compris ni dans la colonne verticale des pressions, ni dans la colonne horizontale des rapports du diamètre à la longueur, il faudrait intercaler par les méthodes ordinaires.

On peut encore résoudre le problème suivant : étant donné, le hauteur H d'un réservoir, la longueur L de la conduite, et le nombre M de mètres cubes que l'on veut avoir par seconde, trouver le diamètre du tuyau capable de fournir cette dépense ; il suffira de mettre pour H , L et M , leurs valeurs dans la formule :

$$D = 0,1865 \sqrt{\frac{L M^2}{H}}$$

Le résultat sera, en mètres, la valeur du diamètre cherché.

114. *De l'écoulement des liquides par les tubes très fins* — M. Girard a fait des expériences très curieuses sur ce sujet ; nous regrettons de n'en pouvoir ici donner que les résultats généraux.

Les liquides qui ne peuvent pas mouiller la substance solide des tubes cessent de s'écouler sous une pression plus ou moins considérable, suivant le diamètre du tube, et suivant sa longueur. Par exemple, sous une pression de 9^{mm},5, le mercure a cessé de couler dans un tube de verre de 1^{mm},12 de diamètre, et de 357 millimètres de longueur. La somme des résistances qui s'exercent contre les parois, sur cette longueur de 357 millimètres, est alors égale à la force impulsive qui résulte d'une pression de 9^{mm},5 ; il serait important de connaître la loi de ce phénomène.

Des liquides qui mouillent les tubes s'écoulent avec la même vitesse, soit qu'on plonge l'extrémité du tube dans un liquide de même nature, en tenant compte de la pression, soit qu'on la laisse libre pour que l'écoulement se fasse dans l'air.

Dans les tubes qui peuvent être mouillés, l'augmentation de température accélère la vitesse dans une proportion considérable : l'eau qui coule dans un tube de verre de 1^{mm},767 de diamètre, et de 939^{mm} de longueur sous une pression de 182^{mm},

coule, par exemple, quatre fois plus vite, quand elle est voisine du point d'ébullition, que quand elle est voisine du point de congélation. La température de moindre vitesse est la température de la glace, et non pas la température du maximum de densité. Dans les tubes qui ne peuvent pas être mouillés, l'augmentation de température n'accélère pas la vitesse.

Sous des pressions égales, et dans des tubes de même dimension, les divers liquides prennent à la même température des vitesses très différentes ; le rapport de ces vitesses varie avec la température.

M. Dubuat est, je crois, le premier qui ait observé l'influence de la chaleur sur la vitesse de l'écoulement ; ensuite M. Gerstner a fait sur ce sujet un grand nombre d'expériences qui ont été publiées en 1800 dans les *Annales* de Gilbert. Ces résultats sont curieux ; mais ils ne suffisent pas pour conclure, comme fait M. Gerstner, que, si la chaleur donne plus d'activité à la végétation et à la vie, c'est seulement parce qu'elle favorise la circulation dans les vaisseaux capillaires des plantes et des corps vivans.

115. *Des injections anatomiques*. — Il y a dans l'organisation des corps vivans, pour la circulation du sang ou pour celle des autres fluides, des vaisseaux tellement nombreux et tellement défilés que l'œil le plus exercé ne peut en suivre la trace, au milieu des tissus où ils vont se ramifier et se subdiviser à l'infini. Pour les rendre perceptibles, on a imaginé depuis long-temps d'y injecter diverses substances : tantôt des substances liquides et vivement colorées, tantôt des substances susceptibles de se coaguler par le refroidissement. L'appareil le plus commode pour ces opérations délicates paraît être celui de M. Duméril ; il se compose d'un long tube vertical d'un ou deux centimètres de diamètre, qui sert de réservoir ; d'un second tube de quelques millimètres de diamètre, et de quelques centimètres de longueur, qui s'ajuste au bas du premier pour établir la communication ; d'un tuyau de gomme élastique fortement attaché à l'extrémité du second tube et servant à diriger le jet ; enfin d'un petit bec qui termine le tuyau de gomme et qui sert en quelque sorte d'entonnoir pour faire passer le liquide dans les vaisseaux les plus défilés ; ce petit bec est un tube de verre effilé à la lampe. La pression est déterminée par la hauteur du liquide dans le réservoir, et pour modérer la vitesse de l'écoulement, il suffit de serrer entre ses doigts le tuyau flexible de gomme élastique.

116. *Des pressions latérales qu'exercent les liquides en mouvement*. — Un liquide qui coule dans des sntages ou dans des tuyaux, exerce toujours contre leurs parois une moindre pression que s'il était en repos. Daniel Bernoulli exprime cette pression qui a lieu pendant le mouvement par $H - \frac{1}{2}U^2$.

Pour comprendre cette formule, considérons la vitesse effective qui anime les molécules liquides dans la section perpendiculaire à l'axe du tuyau ou

de l'ajutage pour laquelle on veut calculer la pression; cette vitesse est due, par le théorème de Toricelli, à une certaine hauteur de niveau qui est la valeur de H' . Concevons ensuite que le tuyau soit coupé suivant cette même section, de telle sorte qu'elle reste ouverte et devienne elle-même l'orifice d'écoulement : alors le liquide prendrait une certaine vitesse, et la valeur de H désigne la pression qui serait capable de la produire. Cette valeur de H n'est pas nécessairement égale à la hauteur réelle du niveau au-dessus du centre de la section ; elle peut être un peu plus petite par l'effet de la contraction, ou un peu plus grande par l'influence des ajutages. Si H' se trouve égale à H , la pression est nulle et les parois ne supportent absolument aucun effort. Si H' est plus grand que H , la pression est négative, c'est-à-dire qu'au lieu d'une pression sur la paroi du tuyau il s'exerce une véritable *succion*. Les expériences par lesquelles on a vérifié jusqu'à présent la formule de Bernoulli ne sont ni assez nombreuses ni assez précises pour qu'on puisse l'employer avec une entière confiance. Cependant le phénomène de succion qu'elle indique est un fait remarquable sur lequel il ne peut rester aucun doute ; il fut constaté par Bernoulli lui-même, et depuis il a été étudié plus particulièrement par Venturi et par M. Eschette. Voici les circonstances dans lesquelles il se produit. Nous avons vu que par un ajutage cylindrique, quand la veine est adhérente, la dépense est plus grande que par un orifice en mince paroi de même diamètre ; donc la vitesse effective est plus grande que la vitesse théorique, et par conséquent H' est plus grand que H ; ce qui doit produire le phénomène de la succion. En effet, si l'on perce l'ajutage d'une petite ouverture latérale pour y mettre un tube recourbé tel que xy (Fig. 120), le liquide monte dans l'intérieur de ce tube, et la hauteur de la colonne soulevée donne la mesure de la force d'aspiration. La dépense étant plus grande encore par l'ajutage à double cône qui est représenté figure 123, et dont nous avons donné les dimensions (110), l'aspiration doit être encore plus grande, son maximum doit être en ss' à la section de la veine contractée, et à partir de là elle doit diminuer à mesure que l'on s'approche de l'extrémité TT' . C'est ce qui est complètement vérifié par les expériences de Venturi : l'ajutage (Fig. 123) avait 88 lignes de longueur, trois tubes verticaux d'ascension venaient s'ouvrir, le premier, à 10 lignes de l'origine, sur la section contractée, le deuxième, à 36 lignes, et le troisième à 62 lignes ou à 26 lignes de l'extrémité TT' ; dans le premier, le mercure est monté à 53 lignes, il est monté dans le second à 20,5 lignes ; et dans le troisième, seulement à 7 lignes. Ces hauteurs correspondent respectivement à 60 pouces d'eau, à 23 pouces et à 8 pouces. La charge d'eau au-dessus de l'ajutage était seulement de 32,5 pouces ; ainsi la force de succion soulevait une colonne d'eau presque double de la hauteur de la chute.

Quand le tube est assez court, cette colonne soulevée affine dans l'ajutage, et se mêle à l'eau qui sort du vase pour alimenter l'écoulement. Ces effets singuliers sont représentés d'une manière assez exacte par la formule précédente. Venturi indiquait cet appareil comme un moyen d'élever l'eau à peu de frais.

117. *De la réaction qui est produite par l'écoulement des fluides.* — Concevons un vase de forme cubique, porté sur des roulettes très mobiles, et posé sur un plan horizontal qui offre peu de frottement. Le vase rempli de liquide restera en repos, parce que toutes les pressions latérales sont égales et contraires. Mais si l'on perce la paroi pour que le liquide jaillisse latéralement, le vase sera repoussé en sens contraire, il y aura un recul semblable au recul des armes à feu ou des fusils à vent (30). Cette réaction est rendue sensible par un appareil que l'on appelle le *tourniquet hydraulique*. Il se compose d'un tube de verre de quelques millimètres de diamètre, dont on reconstruit les bouts, perpendiculairement et en sens opposés, à peu près en forme de π , les deux bouts sont effilés en becs très fins. Au milieu de ce tube on en anode un autre qui doit servir de réservoir. L'appareil est suspendu à un fil ; le réservoir est vertical, les branches sont horizontales, et l'écoulement qui a lieu par les extrémités produit un mouvement circulaire très rapide.

On a cru long-temps, sur l'autorité de Newton, que le recul de cette espèce était égal au poids d'une colonne liquide ayant pour base la section contractée de la veine qui s'écoule, et pour hauteur la hauteur du niveau. Mais Daniel Bernoulli a démontré que, dans tous les cas d'écoulement, la force de réaction est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base la section contractée de la veine qui s'écoule, et pour hauteur le double de la hauteur du niveau. Bernoulli proposait de remonter les fleuves avec des machines fondées sur ce principe, et présentement on en voit sur le Rhône une application qui paraît assez heureuse.

118. *De l'écoulement de l'eau dans les canaux.* — Rien n'est plus variable que la vitesse de l'eau dans les lits des fleuves et des rivières : les pentes plus ou moins rapides, les frottements latéraux, les accidents du fond et les sinuosités des rivages sont des causes qui modifient sans cesse la marche des filets liquides, et qui produisent les remous, les tournois et une foule d'autres phénomènes que l'on peut expliquer dans chaque localité, mais qu'il est impossible de calculer d'avance. Les canaux qui ont une pente uniforme, une direction rectiligne et des dimensions constantes présentent des résultats plus simples et plus généraux. Les différentes couches liquides, depuis celle de la surface jusqu'à celle du fond, sont animées de vitesses différentes, et même, dans chaque couche, les filets des bords et celui du milieu ne peuvent pas avoir la même vitesse, à cause de l'adhérence et du frottement qui

ent lieu au contact des parois. De tous les filets d'eau qui passent à chaque instant dans la section perpendiculaire d'un canal, celui qui a la plus grande vitesse est le filet qui se trouve à la surface et au milieu du lit à égale distance des deux bords. Cette vitesse *maximum* peut être déterminée au moyen d'un corps léger que l'on jette sur la surface, et qui prend à peu près le mouvement de l'eau. On a constaté par un grand nombre d'expériences que, si tous les filets liquides étaient animés d'une vitesse commune qui fût les 8 dixièmes de la vitesse *maximum*, le volume d'eau qui passerait dans un temps donné serait égal au volume d'eau qui passe dans le même temps, en vertu de toutes les vitesses différentes, dont les molécules sont réellement animées. Il suffit donc, pour avoir la dépense d'eau d'un canal, de multiplier la surface de sa section, par les 0,8 de sa vitesse *maximum*. Cette règle est très simple, et paraît être suffisamment exacte pour la pratique.

Dans toutes les sections que l'on peut faire perpendiculairement au cours d'un fleuve, il passe la même quantité d'eau dans le même temps; car c'est à cette condition que le régime est établi, c'est-à-dire que le niveau reste le même en chaque point, sans qu'il y ait tendance à l'accumulation ni à la dépression. Pour connaître la dépense d'un fleuve, il faudrait donc connaître la quantité d'eau qui passe dans une section quelconque. Cela revient à connaître deux choses, savoir la surface de la section et la vitesse moyenne de tous les filets qui la traversent. Mais la vitesse moyenne n'est plus ici, comme dans les canaux, les 0,8 de la vitesse *maximum*; et il serait impossible de déterminer en général le rapport qui existe entre elles, puisqu'il suffit d'un rebassement du fond, d'un creux, d'une sinuosité du rivage, ou même d'une autre cause moins apparente, pour en changer la valeur. Ce qu'il y a de plus simple et de plus exact pour jauger un fleuve est donc de le faire passer par un pertuis dont on connaisse les dimensions et la profondeur au-dessous du niveau, ou de le faire passer sur une digue où il forme une nappe dont on puisse connaître la largeur et l'épaisseur.

119. *Divers appareils pour le mouvement des liquides.* — Comme application des principes précédents et du jeu des pressions atmosphériques, nous essaierons de faire connaître quelques machines usuelles. Nous en avons renvoyé la description à la fin du chapitre, pour ne pas interrompre l'exposition générale.

120. *Du siphon.* — Le siphon est un tube courbé *aa'* (Fig. 141), *aa'* est la courte branche, *aa'* est la grande branche, *ar* est le tube d'aspiration, dont nous verrons plus tard l'usage : pour le moment, nous supposons qu'il n'y soit pas. Les deux branches étant remplies de liquide, la pression est la même au point *a* et au point *a'*, qui sont au même niveau; ainsi en *a'* elle est plus grande de tout le poids de la colonne *aa'*. Le liquide s'é-

coule par la grande branche en vertu de cet excès de pression, et sa vitesse est la même que s'il fût tombé de la hauteur *aa'*.

La même cause fait continuer l'écoulement avec la même vitesse, tant qu'il y a du liquide en *a*. Si cette extrémité de la courte branche plonge dans un vase, le vase se vide, et la vitesse d'écoulement est toujours produite par la différence de hauteur des deux branches : en prenant pour hauteur de chacune d'elles la distance du sommet *S* au niveau du liquide dans lequel elle plonge. Le tube d'aspiration est destiné à amorcer le siphon, c'est-à-dire à le remplir de liquide pour le mettre en activité. Les figures 147 et 148 représentent des siphons d'une autre espèce dont on devinera facilement les effets; on les appelle des *vases de tantale*.

Le siphon n'est pas seulement d'un usage journalier dans les arts, mais il peut encore être employé avec avantage pour détourner le cours d'une rivière. En 1803, M. Lebrun fit passer l'eau de la Moselle, de l'amont à l'aval, d'une digue qu'il s'agissait de réparer, au moyen d'un siphon de 8 centimètres de diamètre; la chute était de 1 mètre. Pour amorcer de tels siphons, on les ferme aux deux bouts, et on les remplit d'eau par le sommet.

121. *Fontaine de compression.* — *r* (Fig. 145) est un vase en cuivre à parois très solides; *r* un tube qui fait corps avec le robinet *a*; ces deux pièces sont soudées, et leur ensemble peut se visser sur le col du vase *v*; *j* est l'ajutage d'écoulement, il se visse au-dessus du robinet *a* : c'est de la grandeur de son orifice que dépend le diamètre du jet; *aa'* est le niveau de l'eau dans le vase. Au moyen d'une pompe foulante qui s'adapte à la place de l'ajutage, au-dessus du robinet *a*, on comprime l'air dans l'espace *aAn'*. Alors la fontaine est chargée, on ôte la pompe, on visse l'ajutage, on tourne le robinet, et le liquide jaillit à une grande hauteur : à une trentaine de pieds, si l'air est seulement comprimé sous deux atmosphères, et à une centaine de pieds, si l'air est comprimé sous cinq ou six atmosphères.

Cet appareil peut être très utile pour éteindre les incendies dès leur origine.

122. *Fontaine intermittente.* — *a* (Fig. 162) est le réservoir d'eau; *jj'* sont les ajutages d'écoulement : la figure n'en représente que deux, *r* est le tube de pression : son extrémité supérieure s'élève au-dessus du niveau de l'eau du réservoir; *r* est le pied de la fontaine, où se trouve le secret des intermittences : on y distingue une échancrure *a* à l'extrémité inférieure du tube, et une ouverture *v* par laquelle l'eau passe du premier fond sur le second. Quand l'échancrure est à nu, l'air passe dans le tube et vient exercer une pression atmosphérique sur la surface *aa'* de l'eau du réservoir; quand l'échancrure est baignée par l'eau qui s'accumule sur le premier fond, l'air ne peut plus entrer par le tube, et la pression diminue de plus en plus dans le réservoir. Les ajutages *j* et *j'* peuvent communi-

quer ou ne pas communiquer avec l'eau de la fontaine, suivant que l'on tourne ou que l'on détourne la vire à laquelle ils sont adaptés; aussitôt que la communication est établie, l'eau coule par les ajutages, tombe sur le premier fond, et s'accumule au-dessus de l'ouverture *e*; cette ouverture laissant passer moins d'eau que n'en donnent les ajutages, le niveau monte de plus en plus, l'échancrure *e* est baignée, la communication de l'air est interceptée, la pression diminue dans le réservoir, et bientôt après, l'écoulement cesse faute d'une pression suffisante. Pendant cette intermittence, l'ouverture *e* laisse passer l'eau du premier fond sur le second, l'échancrure se dégage, la pression de l'air se rétablit, et l'écoulement recommence, pour cesser après un instant, pour recommencer de nouveau, et ainsi de suite. La durée des intermittences dépend des grandeurs relatives de l'ouverture *e* et des ajutages, de la hauteur de l'échancrure, et de la distance des ajutages au niveau de l'eau du réservoir.

En Allemagne, en Angleterre, en Italie, et dans plusieurs provinces de la France, surtout en Languedoc, et près de Pontarlier en Franche-Comté, on trouve des fontaines naturelles qui ont des intermittences comme la fontaine précédente; mais si le résultat est le même, le principe est très différent.

123. *Fontaine de Héron*. Cet appareil (Fig. 153) se compose de trois vases, un vase supérieur L, un vase moyen M, et un vase inférieur I; et de trois tubes, le premier *ai* descendant du fond du vase supérieur au fond du vase inférieur, le second *im* s'élevant du sommet du vase inférieur au-dessus du vase moyen, et le troisième *ms* s'élevant du fond du vase moyen jusqu'à 2 ou 3 décimètres au-dessus du vase supérieur; c'est celui-ci qui forme le jet de la fontaine de Héron. On met de l'eau dans le vase M, au moyen du bouchon B que l'on ferme ensuite; on met parcellément de l'eau dans le vase S, on ouvre le robinet *r*, et le liquide s'élance jusqu'à un point, qui est théoriquement autant élevé au-dessus du niveau du vase moyen, que le niveau du vase supérieur est lui-même élevé au-dessus du niveau du vase inférieur. Cette pression est en effet celle que supporte l'air qui est enfermé dans le vase inférieur et dans le vase moyen.

La Figure 164 représente une autre fontaine du Héron, dont on devinera facilement la disposition; il suffit de quelques tubes du verre pour la construire.

C'est avec un appareil construit sur ces principes que l'on fait l'épuisement de l'eau dans les mines de Schemnitz en Hongrie.

M. Girard avait imaginé des lampes hydrostatiques dans lesquelles l'huile était portée à la mèche par une force ascensionnelle constante, au moyen d'une modification de la fontaine de Héron. Mais les mouvements d'horlogerie l'emportent, pour cet

objet, sur toutes les combinaisons hydrostatiques que l'on a tentées jusqu'à présent.

124. *Lampe de Volta*. — Cet appareil est représenté dans la Figure 185, avec les heureuses perfectionnements que l'on doit à M. Gay-Lussac; il se compose d'un ballon à long col B, renversé dans un vase plus large V, dont il ne touche pas tout-à-fait le fond; la jonction *cc'* doit être hermétiquement fermée; un cylindre creux de zinc *xx'* enveloppe le col du ballon; l'eau aiguisée d'acide sulfurique qui remplit le vase V agit sur le zinc, elle se décompose, son hydrogène se dégage, et par la pression croissante qu'il exerce, l'eau est de plus en plus refoulée dans le ballon B, jusqu'à ce que le niveau soit descendu au-dessus de la dernière tranche *z* du zinc; alors toute action cesse, et l'on a un réservoir rempli d'hydrogène comprimé. En tournant le robinet *r* le gaz se dégage dans l'air par le tube *t*, qui doit être très fin; au même instant, une étincelle électrique en traverse le jet, et le courant du gaz devient un courant de flamme. Nous verrons plus tard comment se produit ce phénomène, et comment le mélange d'hydrogène et d'air est enflammé par l'électricité.

125. *Pompe aspirante et élévatrice*. — La pompe aspirante (Fig. 160) se compose d'un tuyau d'aspiration *aa'*, d'un corps de pompe *cc'*, d'un piston *rr'*, d'un tuyau d'ascension *ss'*, et de trois soupapes *s*, *r*, *z*, qui s'ouvrent de bas en haut. La première soupape *s* est au fond du corps de pompe, la deuxième *r* est dans l'épaisseur du piston, et la troisième *z* est au bas du tuyau d'ascension. Le tuyau d'aspiration plonge dans l'eau que l'on veut élever, et la tige du piston passe dans une boîte à étoupe *xx'* et dans une boîte à graisse *cc'*. A l'origine du mouvement, le piston étant soulevé, la soupape *s* se ferme, et les deux autres *r* et *z* s'ouvrent; la première par l'air supérieur qui se comprime et s'échappe, la seconde par l'air inférieur qui se dilate et passe sous le piston, la pression diminue dans le tuyau d'aspiration, et l'eau s'y élève par l'effet de la pression extérieure. Arrivé au-dessus de sa course, le piston redescend; la soupape inférieure se ferme, l'air se comprime dans le corps de pompe, soulève la soupape du piston, et passe au-dessus. En remontant une seconde fois, le piston soulève l'eau un peu plus haut, et en redescendant une seconde fois il chasse une nouvelle quantité d'air. Enfin, après un certain nombre de coups, si la pompe est bien faite, l'eau arrive au-dessus de la première soupape, elle monte de plus en plus, soulève elle-même la seconde soupape, et passe au-dessus du piston. A partir de cet instant, tout l'air est chassé, et la pompe joue dans l'eau: chaque fois que le piston monte, il soulève toute la colonne d'eau qui est au-dessus de lui, et il entraîne celle qui est au-dessous; chaque fois qu'il descend, il ferme la première soupape, il ouvre la seconde, et s'en vient prendre par sa base la colonne qu'il avait entraînée, pour la soulever à

son tour. L'effort qu'il faut faire pour soulever le piston se compose de deux parties : l'une est le frottement ; l'autre est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base le piston lui-même, et pour hauteur toute la hauteur de l'orifice par lequel l'eau s'écoule dans l'air.

Pour qu'une pompe soit bonne, il faut que l'eau puisse atteindre à la première soupape : ainsi la position de cette soupape dépend du degré de raréfaction que l'on peut donner à l'air qui est au-dessus d'elle, et ce degré de raréfaction dépend lui-même de l'étendue de la course du piston et de la distance des deux soupapes τ et α . Quand cette distance est nulle, le vide est possible, et, à la rigueur, la soupape α pourrait être à 32 pieds de hauteur au-dessus du niveau de l'eau qu'il s'agit d'élever. Si cette distance était seulement de 1 décimètre, et que le piston n'eût que 2 décimètres de course, l'air ne pourrait être amené par le jeu de la pompe qu'à une demi-pression atmosphérique, et la soupape α ne pourrait être tout au plus qu'à 16 pieds de hauteur. Il est facile de calculer la relation générale qui existe entre ces divers éléments.

126. *Pompe aspirante et foulante, à corps de pompe alaisé.* — Elle est représentée dans la figure 149. Elle se compose d'un tuyau d'aspiration α , d'un tuyau d'ascension α' , d'un corps de pompe α' et d'un piston τ ; mais elle a seulement des soupapes α et α' d'aspiration et d'ascension; rien ne passe au travers du piston ni sur son contour, et sa face supérieure est toujours en communication libre avec l'atmosphère.

Quand le piston monte, l'eau est aspirée au-dessus de la soupape α , et quand il descend elle est comprimée, presse la soupape α et soulève la soupape α' .

127. *Pompe aspirante et foulante sans corps de pompe alaisé.* — Cette pompe est représentée dans la figure 151. Elle diffère de la précédente par la forme et l'ajustement du corps de pompe et du piston. Les deux soupapes α et α' du tuyau d'aspiration α et du tuyau d'ascension α' sont aussi un peu différentes; elles présentent une disposition très heureuse, surtout pour les grandes pressions : la première α se compose de deux clapets inclinés qui viennent buter contre les arrêts α et α' quand ils sont soulevés par l'aspiration, et qui retombent sur le prisme s quand ils sont pressés de haut en bas pendant que le piston descend ; la seconde α' se compose d'un seul clapet incliné. L'ajustement que l'on voit au-dessus est en regard pour visiter la soupape et la changer au besoin.

Le corps de pompe n'est point alaisé, parce que le piston ne le touche pas.

Le piston est un cylindre de métal parfaitement tourné qui passe dans la boîte à étoupes α , et dans la boîte à graisse α' ; c'est là qu'est la véritable fermeture de la pompe.

Il est indispensable de ménager un petit conduit pour donner issue à l'air qui se dégage de l'eau et

qui pourrait mettre la pompe hors de service en remplissant le corps de pompe. On peut le faire de deux manières, ou en perçant l'épaisseur du corps de pompe, ou en forant le piston dans sa longueur, et ensuite latéralement comme le représente la figure 150, en ryu , r est la vis de pression qui ferme l'ouverture de ce conduit.

M. Martin a établi à Marly des pompes de cette espèce, qui sont construites avec une rare perfection; elles élèvent l'eau à 500 pieds au-dessus du niveau de la Seine.

128. *Pompe des prétrés.* — Dans cette pompe le piston est remplacé par une membrane élastique (Fig. 142) qui est arrêtée par ses bords, et qui offre en son milieu une soupape de métal α' . Quand la tige t soulève la membrane, le liquide est aspiré, et entre par la soupape α ; au contraire, quand la tige est abaissée, le liquide, comprimé entre les deux soupapes, soulève la soupape α' pour passer au-dessus du piston élastique.

C'est une pompe de cette espèce qui sert à faire monter l'huile dans les lampes de Gotten; on la dispose alors comme dans la figure 143. ce rr représente la section verticale d'une petite caisse en cuivre qui est séparée en deux parties par la cloison H ; la partie de droite se subdivise sur sa longueur en trois ou quatre petits compartiments semblables à celui que représente la figure. Une peau très fine est alternativement soulevée et déprimée au moyen du fil F ; quand elle se soulève, l'huile du réservoir B entre par la soupape α quand elle se déprime, l'huile est refoulée et passe par la soupape α' pour monter dans le tube d'ascension T . Trois compartiments ou trois pompes, ayant leurs soupapes séparées, suffisent pour la continuité du mouvement : l'une est au-dessus de sa course, l'autre au milieu; la troisième à la fin, et l'huile est toujours poussée dans le tuyau d'ascension avec une force à peu près égale. C'est un mouvement d'horlogerie qui met en jeu toutes ces pompes.

129. *Presse hydraulique.* — Cette machine offre de si grands avantages dans les exploitations agricoles et industrielles qu'il nous a semblé nécessaire d'indiquer ici les détails de sa construction. Elle est représentée dans les figures 217, 218, 219, 220 et 221.

Fig. 221. Élévation générale de la presse.

Fig. 218. Coupe verticale.

Fig. 220. Cuir embouti.

Fig. 219. Pièces qui servent à ajuster le piston de la pompe.

Fig. 217. Détails de la soupape de pression.

Il y a deux parties distinctes dans la presse hydraulique, savoir : une pompe aspirante et foulante qui donne la pression, et un plateau à piston qui la reçoit pour la transmettre immédiatement aux corps que l'on veut presser.

La pompe est vue dans l'élévation en AF (Fig. 221), et beaucoup plus en grand dans la coupe verticale, en AF (Fig. 218).

Le plateau à piston est vu dans l'élévation en P' P (Fig. 221), et beaucoup plus en grand dans la coupe verticale, en P (Fig. 218) (ici le plateau P' est enlevé, il ne reste que le piston).

La pompe donne la pression au piston P au moyen du tuyau *t b u*, figures 218 et 221.

En levant le levier L, figure 221, on soulève le piston S de la pompe, figure 218, l'eau de la hache B, figure 221, entre par la pomme d'arrosoir *r*, figure 218, soulève la soupape *s* et passe sous le piston S; quand on presse sur le levier L, on fait redescendre le piston S, l'eau est refoulée, elle ferme la soupape *s*, gagne le conduit *z*, figure 218, soulève la soupape D et passe dans le tuyau *t b u* pour arriver dans le corps CC' de la presse, figures 218 et 221. Là elle presse fortement le piston P et le force à monter avec le plateau P', qui presse à son tour les corps qui se trouvent entre sa surface et la plate-forme EF, figure 221.

Si la section du piston S est la centième partie de la section du piston P, un effort d'un kilogramme sur le premier produira, de bas en haut sur le second, une pression de 100 kilogrammes. Or, au moyen du levier L, un homme peut aisément exercer sur le piston S un effort de 300 kilogrammes; ainsi le piston peut aisément être poussé avec une puissance de 30,000 kilogrammes.

Tel est le principe fondamental de la presse hydraulique. Nous indiquerons maintenant comment on mesure les pressions et comment on est parvenu à éviter les fuites.

Les pressions se mesurent au moyen de la soupape G, figure 218; en on voit les détails dans la figure 217. Connaissant le poids *p*, sa distance *y f* au point d'appui *f*, la distance *x f* du point par lequel le levier presse sur la soupape et enfin la section de la soupape, il est facile de calculer la pression qu'elle éprouve de la part du liquide lorsque le levier *f y* est soulevé.

Pour éviter les fuites, on ajuste d'abord avec un soin particulier le piston S; les pièces qui servent à cet usage sont vues en grand dans la figure 219; c'est la même disposition que dans la pompe de Marly, figure 181. Mais la principale difficulté se trouvait au piston P; c'est Bramah qui l'a résolu par l'heureuse invention du cuir embouti dont on voit une coupe dans la figure 220. Ce cuir est disposé en *mm'*, figure 218, dans un espace annulaire, pratiqué à cet effet dans le corps CC' de la presse; il est facile de voir par sa forme et sa disposition qu'il ferme d'autant mieux que la pression est plus forte; car l'effet de la pression est de le pousser en même temps contre le piston P, qu'il embrasse étroitement, et contre les parois de l'espace annulaire.

La vis K sert à la *dépression*; lorsqu'on la détourne, le liquide revient du corps de la presse par le tube *u s t* et s'échappe par l'ouverture *v*.

130. *Bélier hydraulique*. — Cette machine, qui fut découverte en 1797, par Mongolfier, l'inven-

teur des aérostats, n'est pas moins remarquable par le principe nouveau sur lequel elle repose, que par les nombreux avantages qu'elle peut offrir. Nous essayerons d'abord de faire comprendre le principe de mécanique d'où elle tire sa force motrice. Un corps quelconque, solide ou fluide, étant animé d'une certaine vitesse, imaginons que l'on arrête quelques-unes de ses parties; à l'instant toutes les autres, qui ne sont pas directement arrêtées, vont exercer sur celles-ci des efforts différens: celles qui sont en avant tendront à les entraîner après elles ou à s'en séparer; celles qui sont en arrière, voulant aussi continuer leur route, se précipiteront en vertu de leur vitesse acquise, et se presseront les unes sur les autres en même temps qu'elles presseront les parties immobiles. Une bêche, par exemple, étant animée d'un mouvement rapide, si on l'arrête tout à coup par le milieu, la partie antérieure, tendant à entraîner la partie arrêtée, éprouverait une traction dans toute sa longueur, et cet effort pourrait la rompre si la vitesse était assez grande; au contraire la partie postérieure, tendant à pousser la partie arrêtée, éprouverait une pression dans toute sa longueur, et toutes ses tranches seraient refoulées les unes sur les autres. De même, quand une colonne d'eau est en mouvement dans un tube et que tout à coup un obstacle l'arrête, elle presse cet obstacle en vertu de sa vitesse acquise; la première tranche qui le touche est bientôt arrêtée, et pressée à son tour par la tranche qui vient après, et ainsi *successivement* jusqu'à la tête de la colonne; pendant ce temps, qui est très court, le tuyau supporte un excès de pression latérale, dépendant de son diamètre et de la vitesse de l'eau, et c'est cet excès de pression résultant du mouvement arrêté qui devient la force motrice du bélier hydraulique.

TT' (Figure 222.) est un tuyau dans lequel se meut l'eau d'une source avec une vitesse dépendante de la hauteur de la chute; c'est le corps du *bélier*. L'eau s'écoulerait par l'orifice V, s'il n'y avait pas d'obstacle, et gagnerait le niveau NN', qui est le niveau naturel au-dessous de la chute; mais vers cette extrémité du tuyau on ajuste diverses pièces qui forment la *tête du bélier*. S est une soupape dont la densité est double de celle de l'eau; l'eau peut la soulever par sa vitesse, et l'appliquer contre l'ouverture V qui se trouve alors exactement fermée; on l'appelle *soupape d'arrêt*. Quand la soupape S est fermée, l'eau passe par le conduit *x* et s'élève dans le vase en fonte BB', d'où elle passe par le clapet C, dans la grande cloche en fonte HH', d'où elle gagne enfin le tuyau d'ascension DEK. Là elle s'arrêterait lorsqu'elle serait parvenue à la hauteur du niveau supérieur de la chute, s'il n'y avait pas une force motrice capable de la pousser plus haut. Mais cette force se développe de la manière suivante: l'eau de la source, ayant acquis assez de vitesse par son

écoulement naturel, soulève la soupape S et ferme l'ouverture V; alors la pression latérale résultant du mouvement arrêté exerce un effort sur tous les points de la paroi du tuyau. Cette pression pousse le liquide en *x*, le clapet C est soulevé et l'eau passe dans la cloche HH'; la durée de cette ascension est un peu prolongée par la réaction élastique de toutes les pièces de l'appareil. Bientôt le clapet C et la soupape S retombent par leur poids, l'un, pour fermer l'ouverture du vase BB', et l'autre pour ouvrir l'orifice d'écoulement. La série des efforts rapides qui se succèdent jusqu'à cet instant, est ce que l'on nomme un *coup de bélier*. Dès que l'écoulement naturel a recommencé, la vitesse s'accroît promptement; la soupape S est de nouveau soulevée, et les mêmes phénomènes se

reproduisent. On détermine par des essais la disposition des pièces, et surtout le jeu qu'il faut donner à la soupape S pour obtenir le plus grand effet possible. La limite de hauteur à laquelle on peut élever l'eau par cet appareil dépend du diamètre du tuyau et de la vitesse que l'eau peut prendre en le traversant.

On voit en *a* un piston qui sert à rendre de l'air pour remplacer celui qui est en A, dans le vase BB', et qui se dissout peu à peu; l'air rentre de lui-même et par le jeu de l'appareil.

Il paraît que dans la pratique le bélier donne plus de 60 pour 100 de la force réelle de l'eau de la source; c'est à peu près ce que peuvent donner les roues à *pois* les mieux construites; les roues *en dessous* ne donnent qu'environ 25 ou 30 pour 100.

CHAPITRE IX.

DU MOUVEMENT DES GAZ.

131. Les gaz peuvent s'écouler comme les liquides, par des orifices en minces parois, par des joints ou par des tuyaux; ils peuvent s'écouler aussi sous des pressions constantes ou sous des pressions variables. Les appareils au moyen desquels on obtient des écoulements constants se nomment des *gazomètres*.

132. *Des gazomètres.* — Lorsqu'on recherche une grande précision, l'écoulement constant du gaz est produit par l'écoulement constant d'un liquide; rien n'est plus commode pour cet usage que le vase de Mariotte. On le dispose alors comme dans la figure 128; le grand col du ballon est mastiqué dans le réservoir de gaz; l'eau tombe par l'orifice *e*; s'il en arrive 20 litres en 1', il faut que 20 litres de gaz soient chassés dans le même temps par les orifices ou par les tuyaux d'écoulement. Pour appliquer ce principe aux gaz différents de l'air, on les recueille dans de grandes vessies ou dans des ballons de baudruche que l'on enferme dans un second réservoir; l'air qui sort du premier réservoir arrive dans le second, et exerce sur ces membranes élastiques une pression constante qui produit de même un écoulement constant.

Les grands gazomètres de l'éclairage sont construits sur un autre principe: un cylindre à un seul fond est renversé sur une grande citerne remplie d'eau. Ce cylindre est en feuilles minces de métal, et *a*, par exemple, 10 mètres de diamètre, contient 100 mètres cubes de gaz, et pèse, je suppose, 10000 kilogrammes. Il s'enfonce pas dans l'eau, puisqu'il est plein de gaz, seulement il presse de

tout son poids sur ce gaz intérieur, et le tient à une pression plus forte que la pression atmosphérique. Dans notre hypothèse, cet excès de pression serait de 10000 kilogrammes sur une base de 10 mètres de rayon; ce qui fait à peu près une colonne d'eau de 13 centimètres. Si l'on conçoit maintenant que du fond de la citerne s'élève un tube, qui vienne d'une part s'ouvrir un peu au-dessus du niveau intérieur de l'eau pour communiquer avec le gaz du gazomètre, et qui s'en aille d'une autre part se subdiviser en une foule de ramifications terminées par des becs d'éclairage, on verra qu'il suffit de tourner un robinet pour éclairer une grande ville. L'écoulement du gaz sera constant, parce que le gazomètre ne fera qu'une petite perte de poids en s'enfonçant dans l'eau de la citerne; au reste, on peut, avec des contre-poids, lui donner encore plus de régularité ou modérer sa pression. Pour remplir le gazomètre, on ferme le robinet de distribution, et l'on ouvre un autre robinet qui établit la communication entre les cornues où se forme le gaz et le tube vertical qui s'élève du fond de la citerne au-dessus du niveau intérieur de l'eau.

133. *Loi de l'écoulement des gaz d'après la théorie de Daniel Bernoulli.* — Daniel Bernoulli avait supposé que le théorème de Toricelli s'applique aux gaz comme aux liquides, et, en partant de ce principe, il exprimait la vitesse d'écoulement d'un gaz par la formule suivante :

$$V = \sqrt{\frac{2K(P - P')}{P}}$$

V est la vitesse d'écoulement.

P la pression intérieure.

P' la pression extérieure.

2 K un coefficient constant égal à 155610 pour l'air à la température de la glace fondante, et dont les valeurs changent en raison inverse des densités, pour les autres gaz pris à la même température.

134. *Loi de l'écoulement des gaz d'après la théorie de M. Navier.*—Tous les géomètres qui s'étaient occupés de l'écoulement des fluides élastiques avaient adopté les principes de Daniel Bernoulli; mais M. Navier vient d'établir une théorie nouvelle dans un mémoire très remarquable imprimé dans les Mémoires de l'Académie des Sciences pour 1830. D'après M. Navier la vitesse d'écoulement est exprimée par la formule

$$V = \sqrt{\frac{2K}{\log P - \log P'}}$$

Les mêmes lettres désignent les mêmes choses que dans la formule précédente; mais le coefficient 2 K doit être multiplié par 2,30258 lorsqu'on veut se servir des tables de logarithmes ordinaires.

Cette formule ne s'applique qu'au cas où l'orifice d'écoulement est très petit par rapport à la section du gazomètre.

135. Il est facile de voir que ces deux formules donnent à très peu près les mêmes résultats lorsque la pression P ne surpasse que très peu la pression P' , et qu'elles donnent des résultats bien différents quand les pressions intérieures et extérieures présentent une grande différence.

136. Les vitesses données par les formules précédentes sont les *vitesses théoriques*, et pour vérifier la théorie il est nécessaire de les comparer aux *vitesses effectives*; celles-ci se déterminent par l'expérience, comme pour les liquides, en observant le volume de gaz qui sort dans un temps donné. Les expériences les plus précises qui aient été faites sur ce sujet sont dues à M. Lagerhjelm (Mém. de l'Acad. de Stockholm, 1822) et à M. D'Aubuisson (Ann. des Mines, 1826). Les vitesses effectives trouvées par ces habiles observateurs sont moindres que la vitesse théorique donnée par la formule de M. Navier: on en conclut que la *veine gazeuse* éprouve une contraction comme la *veine liquide*; et en cherchant quelle grandeur il faudrait donner à la section contractée pour que la théorie représentât tous les résultats de l'expérience, on trouve que cette section devrait être égale à celle de l'orifice multipliée par 0,61 ou 0,62. Ainsi, il y a dans les gaz contraction de la veine fluide, et cette contraction est sensiblement la même que dans les liquides.

137. Quand les gaz s'écoulent du gazomètre par des ajutages coniques ou cylindriques dont la longueur est tout au plus 7 ou 8 fois le diamètre, on trouve que la dépense est plus grande que par les orifices en minces parois, comme pour les liquides; mais jusqu'à présent il n'y a pas un assez grand nombre d'expériences pour faire dans ce cas une

comparaison exacte entre la dépense effective et la dépense théorique.

138. *De l'écoulement des gaz dans les tuyaux.*—M. Girard a tiré les conséquences suivantes, d'une série d'expériences qu'il a faites avec M. Cagniard-Latour sur l'écoulement de l'air et de l'hydrogène carboné :

1° Que le gaz hydrogène carboné et l'air atmosphérique amenés au même état de compression, se meuvent suivant les mêmes lois et éprouvent exactement la même résistance dans les mêmes tuyaux, et cela indépendamment de leurs densités spécifiques.

2° Que les résistances qu'éprouvent les fluides aériformes à se mouvoir dans les tuyaux de conduite sont exactement proportionnelles aux carrés de leurs vitesses moyennes.

3° Enfin que, en conséquence de cette loi et de celle du mouvement linéaire, les dépenses du gaz par une conduite donnée de grosseur uniforme, sont toujours en raison directe de la pression indiquée dans le réservoir qui alimente l'écoulement, et en raison inverse de la racine carrée de la longueur de la conduite par laquelle il s'opère.

Les expériences pour chaque gaz ont été faites dans deux conduites : la première avait 0^m,081 de diamètre, et les longueurs ont été successivement 120^m, 376^m, et 623^m; la deuxième avait 0,016 de diamètre, et les longueurs ont été successivement 37^m, 66^m, 83^m, 109^m, 136^m. La pression, dans toutes les expériences, a été de 0^m,034 d'eau. Un orifice en mince paroi de même diamètre que la petite conduite donnait une dépense onze fois plus grande qu'une longueur de 126 mètres de cette conduite; ce rapport a été le même pour l'air et pour l'hydrogène carboné.

139. Les coudes, les renflements, les inégalités quelconques dans les tuyaux de conduite produisent toujours, dans les gaz comme dans les liquides, une diminution dans la vitesse d'écoulement.

140. *De l'écoulement des gaz par les tubes très fins.*—Il résulte de quelques essais de M. Faraday, sur l'écoulement des gaz par des tubes très fins, qu'il se produit alors des phénomènes singuliers dépendant de la pression et de la nature des gaz; les gaz les plus légers, qui, sous de fortes pressions, s'écoulent le plus vite, paraissent au contraire s'écouler le plus lentement sous de moindres pressions. Des recherches plus précises sur ce sujet seraient d'une grande importance.

141. *Des pressions latérales des gaz pendant l'écoulement.*—Il se produit, dans les grandes souffleries des forges, un phénomène remarquable qui n'a pas échappé à la sagacité de MM. Boignes, propriétaires des forges de Fourchambault, et dont MM. Thénard et Clément ont été témoins au mois de septembre 1826. Une ouverture de 1 à 2 pouces de diamètre étant faite dans la paroi plane d'un réservoir d'air comprimé, l'air s'échappe avec une

grande violence; mais si on en approche un disque de bois ou de métal de 7 ou 8 pouces de diamètre, et qu'après avoir vaincu la première résistance on l'applique sur l'ouverture, il n'est plus repoussé comme auparavant; il oscille vivement, en s'éloignant ou en se rapprochant de l'ouverture dans des limites très rapprochées; l'air continue de s'échapper avec grand bruit, entre la surface du disque et celle de la paroi; et si alors on voulait retirer le disque, il faudrait un grand effort: quoique séparé de la paroi, il semble collé contre elle. M. Clément donne de ce phénomène une explication qui semble tout-à-fait conforme aux principes du mouvement des fluides. La veine qui sort de l'ouverture doit s'épanouir en lame très mince pour passer entre le disque et la paroi (Fig. 131); son épaisseur restant la même, elle doit s'élargir à mesure qu'elle approche de la circonférence du disque; ainsi elle se trouve dans le même cas que la veine fluide qui doit remplir un cône dont les sections deviennent toujours croissantes; de là une espèce de succion toute pareille aussi à celle que l'on observe dans les ajustages coniques. C'est donc la pression atmosphérique qui agit, de dehors en dedans, sur la surface du disque, avec une portion plus ou moins grande de son énergie, suivant que

la pression latérale est plus ou moins réduite; et comme cette pression latérale est très différente aux différentes distances de l'ouverture, il est nécessaire qu'aux points où elle est le plus faible, elle se trouve beaucoup moindre que la pression atmosphérique. Il paraît que la différence qui existe entre la pression atmosphérique et la somme des pressions latérales est elle-même dépendante de l'épaisseur de la lame d'air qui s'écoule, et qu'elle devient plus grande quand cette lame devient un peu plus épaisse; de là les oscillations du disque et l'effort qui est nécessaire pour le détacher. Les conditions de ce phénomène de succion peuvent être, pour les gaz, très différentes de ce qu'elles sont pour les liquides, à cause de la différence totale des affinités moléculaires.

Ce fait n'a pas seulement une grande importance théorique, mais il éveille l'attention sur un véritable danger que peuvent offrir les soupapes de sûreté des machines à vapeur: on voit en effet que, sous certaines conditions, la lame mince de vapeur qui s'échappe, au lieu de repousser au loin la soupape pour s'ouvrir une large issue, pourrait se transformer en une force attractive d'autant plus capable de la retenir que la danger serait plus grand.

FIN DE LIVRE PREMIER.

LIVRE DEUXIÈME.

DE LA CHALEUR.

NOTIONS GÉNÉRALES.

142. L'air, l'eau et les divers corps de la nature peuvent exciter en nous des sensations particulières, que l'on appelle sensations de *chaleur* ou de *froid*. Ces affections se produisent au contact immédiat ou à de grandes distances, et elles sont d'une telle nature que nous ne pouvons en attribuer la cause à la substance propre des corps. En présence d'un foyer allumé, nous jugeons facilement que ce n'est pas la matière du charbon qui vient sous forme invisible nous toucher et nous réchauffer; et quand nous recevons les rayons solaires, nous jugeons de même que ce n'est pas la matière pondérable du soleil qui descend vers la terre, pour produire sur nos yeux l'impression de la lumière, et sur toutes les parties sensibles de notre organisation l'impression de la chaleur. Il y a donc un agent qui est distinct de la substance propre des corps, qui réside dans leur masse, qui se transmet à distance, qui établit une communication continuelle entre eux et nous, et qui est la cause des sensations de chaleur ou de froid que nous éprouvons. Cet agent a reçu différents noms : d'abord, confondant la cause avec l'effet, on l'a appelé *chaleur*; ensuite, par des notions plus justes sur son mode d'existence, on l'a nommé *fluide igné*, *matière du feu*, etc.; enfin, à la réforme de la nomenclature chimique, Lavoisier, Berthollet, Morven et Fourcroy l'ont appelé *calorique*. Cette dénomination a été adoptée par tous les physiciens, et l'on a conservé le mot *chaleur* pour désigner la science qui traite des propriétés, des effets et des lois du calorique.

Cependant on ne s'en tient pas toujours à ces strictes définitions : il arrive souvent que le mot *chaleur* est employé pour désigner l'agent lui-même qui produit les phénomènes, et que le mot *calorique* est aussi employé pour désigner l'ensemble de nos connaissances sur ces phénomènes et sur leurs lois.

143. Le calorique n'agit pas seulement sur les corps organisés, mais il agit aussi sur les corps inorganiques. Le glaco peut fondre, l'eau peut entrer en ébullition, le fer peut rougir au feu; tous

ces phénomènes, et tant d'autres du même espèce, ont nécessairement une cause, et nos sens nous avertissent que cette cause est le calorique. Il y a une telle correspondance, une telle simultanéité entre ces modifications qui surviennent dans les corps et les changements qui surviennent dans nos sensations, que nous craignons peu de nous tromper en portant ce jugement. Ces seules indications peuvent nous servir à classer les phénomènes du calorique, et à établir d'avance l'ordre dans lequel nous devons en faire l'étude.

Nous diviserons la théorie de la chaleur en cinq parties. La première et la deuxième partie auront pour objet les deux effets physiques que le calorique produit dans les corps, savoir : 1^o la *dilatation* ou les variations de volume; et 2^o le *changement d'état* ou le passage de l'état solide à l'état liquide, et de l'état liquide à l'état de vapeur.

La troisième et la quatrième partie auront pour objet les propriétés du calorique lui-même. Dans la troisième partie nous traiterons de la *propagation du calorique*, qui comprend la *conductibilité* ou la propagation au contact, et le *calorique rayonnant* ou la propagation à distance; et dans la quatrième partie, nous traiterons du *calorique spécifique*, c'est-à-dire de la mesure des quantités de calorique qui sont nécessaires pour produire des efforts déterminés sur des quantités de matière connues.

La cinquième partie aura pour objet la *production de la chaleur et du froid*, c'est-à-dire les actions mécaniques ou chimiques que la matière peut exercer sur la chaleur, pour la dégager ou pour l'absorber.

Nous essaierons d'abord de donner une idée générale des phénomènes qui servent de base à ces divisions de la théorie générale de la chaleur.

144. DILATATION. — Nous avons vu (13) que le calorique dilate tous les corps; que le volume d'un corps quelconque dépend du degré de chaleur qu'il éprouve, et que, toutes choses égales d'ailleurs, le même degré de chaleur lui donne toujours exactement le même volume. Ainsi les degrés de dila-

tation peuvent nous servir à mesurer les degrés de chaleur. On appelle *température* d'un corps l'état de volume auquel il se trouve par l'influence du calorique; et l'on appelle *thermomètres*, les instruments qui servent à mesurer les températures.

La Figure 159 représente un *thermomètre à mercure*; la *boule a* est pleine de mercure, et ce liquide n'élève dans la *tige r*, jusqu'à une certaine hauteur *n*, qui dépend de la température. Lorsqu'on chauffe la boule, le mercure *augmente* de volume, le thermomètre *monte*, et l'on dit que la *température s'élève*; lorsqu'on la refroidit, le mercure *diminue* de volume, le thermomètre *descend* et la *température s'abaisse*. Toutes les fois que le thermomètre revient au même point ou au même état de volume, la température est la même. Si l'on prenait un autre thermomètre à mercure (Fig. 160), plus grand ou plus petit que le premier, ces deux instruments monteraient et descendraient ensemble; mais les ascensions et les dépressions pourraient être très différentes: les *réservoirs a* et *c* étant égaux, il suffirait, par exemple, que le tube du premier eût un diamètre dix fois moindre que le tube du second, pour que ses mouvements eussent cent fois plus d'étendue; quand il monterait de 100 millimètres, le second ne monterait que de 1 seul millimètre. L'un serait cent fois plus *sensible* que l'autre.

Ces thermomètres ne pourraient servir qu'à indiquer des températures *égales*, des températures *plus hautes* et des températures *plus basses*, suivant que le sommet de la colonne reviendrait à un même point fixe, ou qu'il varierait au-dessus ou au-dessous de ce point. De cette manière, ils pourraient déjà être de quelque avantage pour la science; mais ce qu'il y a d'essentiel dans les thermomètres, c'est leur *graduation*; car ce n'est qu'en les graduant, que l'on peut parvenir à exprimer les températures par des nombres, à les comparer entre elles, et à en déduire les lois du calorique.

Les principes de la *graduation* des thermomètres reposent sur ce fait: qu'il y a des phénomènes qui se produisent toujours à la même température. Ainsi, en prenant dans la paume des mains un des thermomètres précédents, on le verra monter plus ou moins, suivant que l'on aura les mains plus chaudes ou plus froides. Mais si l'on a la patience d'attendre, et de tenir les mains pressées jusqu'à ce qu'elles se soient réchauffées le plus possible, on verra le thermomètre qu'elles tiennent enfoncé monter lentement jusqu'à une certaine limite, où il arrivera toujours, et qu'il ne dépassera jamais. Dans toutes les saisons, sous tous les climats et chez tous les individus il s'arrêtera au même point ou à très peu près. Ainsi la température du corps humain est une température constante, et elle offre un *point fixe*, que l'on pourrait prendre pour point de départ dans l'évaluation numérique des températures. Cependant il y a d'autres phénomènes qui sont plus mathématiquement constants, et auxquels il est plus

simple de recourir. Dans la *glace fondante*, no thermomètre revient toujours exactement au même point, soit que cette glace ait été formée artificiellement, soit qu'elle ait été formée naturellement au-dessus des montagnes, sur les rivières ou sur les mers: pourvu qu'elle soit composée d'eau bien pure, son *point de fusion* est un point parfaitement fixe. Il en est de même pour les différents points auxquels les corps *fusibles*, comme la cire, le plomb, etc., passent de l'état solide à l'état liquide; chacun d'eux entre en fusion à une température qui est toujours la même. Ce fait fondamental paraît avoir été observé pour la première fois par Amontons (*Ac. des Sciences*, 1703).

L'*ébullition de l'eau* présente un phénomène analogue: une fois que la chaleur est arrivée au point où l'eau bout avec force, en poussant le feu plus vivement on arrive à la faire bouillir plus vite, mais non pas à la chauffer davantage; le thermomètre reste au même point parfaitement immobile. Sous la même pression barométrique, dans tous les lieux de la terre, l'eau pure en ébullition donnera le même point fixe. Il en est de même de tous les corps au moment où ils passent de l'état liquide à l'état de vapeur par l'ébullition; chacun d'eux a son point particulier, qui est fixe sous la même pression.

Concevons maintenant que l'on prenne *deux points fixes*, celui de la *glace fondante*, par exemple, et celui de l'eau *bouillante*, et que, les ayant marqués l'un et l'autre sur le tube ou sur la tige du thermomètre, on divise l'intervalle en 100 parties égales, et que l'on continue les divisions ou *degrés* au-dessus et au-dessous des points extrêmes, on aura un *thermomètre gradué*, qui s'appelle *thermomètre centésimal*, et qui s'appellerait *thermomètre de Réaumur*, si l'on avait divisé l'intervalle en 80 parties seulement. Le point de la glace fondante est le *zéro* de la division, et les degrés qui sont *au-dessous* se distinguent par le signe *moins*; — 10° ou — 20° signifient *moins dix* ou *moins vingt degrés*.

145. CHANGEMENT D'ÉTAT. — 1 kilogramme de glace à la température de *zéro*, et un kilogramme d'eau à la température de 75°, donnent, après leur mélange et après la fusion complète de la glace, deux kilogrammes d'eau à la température 0. Ainsi la glace a été fondue, mais elle n'a pas changé de température; l'eau chaude à 75° est restée liquide, mais elle s'est refroidie jusqu'à la température de la glace. Donc le kilogramme de glace, *pour se fondre*, a *absorbé* tout le calorique qu'a perdu le kilogramme d'eau, en descendant depuis 75° jusqu'à 0; il l'a absorbé pour se fondre, puisque sa température n'a pas changé. Le calorique absorbé et comme dissimulé dans la masse liquide qui résulte de la fusion s'appelle *calorique latent* ou *calorique de fusion*. L'eau en se congelant reproduit et dégage de nouveau, pendant sa *solidification*, tout le calorique qu'elle avait absorbé pendant sa

fusion, c'est-à-dire qu'un kilogramme de glace à 0 et un kilogramme d'eau à 0 n'ont pas la même quantité de chaleur, quoique étant à la même température; l'eau en a plus que la glace, et ce qu'elle en dégage pendant qu'elle se congèle, serait capable d'élever un autre kilogramme d'eau de 0 à 76°.

Le même phénomène se produit dans le passage de l'état liquide à l'état de vapeur. Au moment de sa formation la vapeur se trouve à la même température que le liquide qui lui donne naissance, mais à poids égal elle a beaucoup plus de calorique; car elle en absorbe, à mesure qu'elle se forme, bien plus encore que la glace n'en absorbe à mesure qu'elle se fond. Ce calorique absorbé et dissimulé dans la masse gazeuse de la vapeur s'appelle encore *calorique latent*, et quelquefois *calorique de vaporisation* ou *calorique d'élasticité*. Quand la vapeur revient à l'état liquide, elle reproduit et dégage de nouveau, pendant sa condensation, toute cette quantité de calorique qu'elle avait dû prendre pendant sa formation.

Ces absorptions de calorique en proportions différentes, pendant la fusion et la vaporisation, et ces reproductions égales, pendant la solidification et la condensation, se manifestent nécessairement dans tous les corps. *Le phénomène de la chaleur latente est la condition essentielle des changements d'état.*

146. PROPAGATION DU CALORIQUE. — Le calorique se propage dans les corps et il se propage à distance.

Dans les corps il se répand de proche en proche, jusqu'aux molécules les plus intérieures de leurs substances. Au feu de forge, par exemple, les pièces de fer sont d'abord échauffées à leur surface, puis le calorique gagne peu à peu, et pénètre enfin toute l'étendue de la masse qui est enveloppée de feu. Cette propagation intérieure du calorique est ce que l'on appelle la *conductibilité* ou la *conductibilité*; elle est plus ou moins rapide, suivant la nature des corps. On nomme *bons conducteurs* ceux qui se laissent pénétrer facilement par la chaleur, et qui prennent rapidement la température qu'ils doivent avoir; et *mauvais conducteurs* ceux qui se laissent pénétrer moins facilement, et qui sont plus lents à se mettre en équilibre de température dans toutes leurs parties. Les métaux sont en général de bons conducteurs.

Le verre, le soufre, le charbon, les pierres de différentes espèces, toutes les substances végétales et animales, sont en général de mauvais conducteurs; les liquides et les gaz sont les plus mauvais conducteurs que l'on connaisse.

A distance, le calorique se propage à peu près comme la lumière: il traverse le vide avec une grande vitesse, comme la lumière traverse les espaces célestes; il passe dans certains corps, sans s'y arrêter et sans les rendre chauds, à peu près comme la lumière passe dans le verre, sans s'y

éteindre et sans le rendre lumineux. Ce mode de propagation est ce que l'on appelle le *rayonnement du calorique*; c'est par rayonnement que le calorique du soleil arrive à la terre; c'est aussi par rayonnement qu'un foyer nous échauffe à travers les couches d'air qui nous séparent de lui, et qu'un corps très peu chaud nous fait sentir sa présence, même à une assez grande distance. Le *calorique rayonnant* devient du calorique ordinaire, lorsqu'il est absorbé par les corps et qu'il se répand par la conductibilité dans les différentes parties de leur masse; et réciproquement, le calorique qui s'échappe des corps, à mesure qu'ils se refroidissent, s'échappe sous la forme de calorique rayonnant, à moins qu'il ne rencontre immédiatement des corps qui l'absorbent et dans lesquels il ne puisse passer que de molécule à molécule.

147. CALORIQUE MÉCANIQUE. — Les diverses températures des corps expriment les variations de leurs volumes, mais elles s'expriment pas les *quantités de calorique* qu'ils reçoivent ou qu'ils perdent pour éprouver ces variations. Par exemple, quand le thermomètre à mercure s'élève de 1°, le mercure prend la centième partie de l'accroissement de volume qu'il est susceptible de prendre, depuis la température de la glace fondante jusqu'à celle de l'ébullition de l'eau; mais nous ne pouvons pas savoir d'avance s'il prend en même temps la centième partie du calorique qui lui est nécessaire pour passer de l'une à l'autre de ces températures. A plus forte raison, des corps différents, ayant le même poids et la même température, peuvent exiger des quantités de chaleur très différentes, pour s'élever l'un et l'autre à une température plus haute de 1°; et, en effet, 1 kilogramme de mercure, par exemple, exige beaucoup moins de chaleur que 1 kilogramme d'eau, pour passer de 0 à 1°, ou de 1° à 2°, ou de 99° à 100°. A poids égal et à température égale, un corps est dit avoir plus de *capacité pour la chaleur* qu'un autre corps, lorsqu'il exige une plus grande quantité de chaleur pour éprouver les mêmes variations de température; s'il en exige le double, sa capacité est double; s'il en exige le triple, sa capacité est triple, etc.; ainsi la capacité de l'eau est à peu près 30 fois plus grande que celle du mercure, puisque, à poids égal et à température égale, l'eau reçoit 30 fois plus de chaleur que le mercure quand elle s'élève de 1°, et qu'elle en perd 30 fois plus quand elle s'abaisse de 1°.

148. PROTECTION DE LA CHALEUR ET DU FROID. — Le calorique peut être accumulé dans les corps, mais il ne peut pas y être retenu et enfermé, comme l'air, l'eau et les autres fluides poudrables sont enfermés dans les vases; aucune substance n'est impénétrable au calorique: c'est un fluide *incoercible* qui est sans cesse en mouvement pour se communiquer de proche en proche dans les corps contigus, ou pour se répandre dans l'espace sous forme rayonnante. Si un corps chaud,

tel qu'un boulet, par exemple, était enfoncé à 10 pieds sous terre, tout le monde sait que sa chaleur se communiquerait aux couches environnantes, puis de celles-ci aux suivantes, et ainsi de proche en proche jusqu'à de très grandes distances; après un temps assez long, ce boulet se serait refroidi, mais aucune portion de sa chaleur ne se serait perdue; elle serait répandue dans les corps voisins, et l'on pourrait à la rigueur la retrouver et la recueillir en totalité. Lorsqu'un corps se refroidit dans l'air, le phénomène est différent : une portion de sa chaleur passe aux molécules d'air qui le touchent, mais une portion s'échappe sous forme rayonnante, à peu près comme la lumière s'échappe de la flamme; et ces rayons de calorique se répandant de toutes parts, les uns vont tomber sur des corps qui les arrêtent et les absorbent en partie, les autres s'élèvent vers le zénith, traversent toute l'épaisseur de l'atmosphère et vont se perdre dans le vide du ciel. Il y en a sans doute qui vont tomber sur le soleil et sur les corps célestes, comme il arrive aussi à la lumière d'une bougie de se répandre jusqu'aux astres. Ce qui est vrai d'un corps suspendu dans l'air est vrai pareillement du globe entier de la terre, suspendu au milieu de l'espace. Ainsi la terre se refroidit : à chaque instant l'atmosphère et tous les corps terrestres qui sont exposés à l'aspect du ciel perdent de leur calorique par le rayonnement. Il faut donc qu'il y ait des sources de chaleur qui réparent à chaque instant les pertes que fait la terre, et qui puissent maintenir sur sa surface cette température moyenne dont l'intensité est une condition nécessaire des phéno-

mènes de la végétation et des fonctions de la vie.

Nous verrons qu'il y a trois sources de chaleur pour compenser le refroidissement que la terre éprouve, et pour maintenir d'une manière à peu près permanente l'équilibre des températures terrestres. La première est une chaleur primitive qui règne encore à de grandes profondeurs, et qui se dissipe peu à peu; elle entretient les parties centrales de la terre à une température sans doute plus haute que celle du fer fondu, mais elle ne contribue que dans une faible proportion aux températures de la surface.

La seconde est la chaleur solaire, dont nous donnerons la mesure dans les *Éléments de Météorologie* : nous verrons que tout le calorique que le soleil répand sur la terre dans le cours d'une année est capable de fondre une certaine quantité de glace que nous sommes parvenus à déterminer par des moyens simples et rigoureux.

La troisième source de chaleur est celle qui résulte des actions mécaniques et chimiques qui s'exercent sur la matière. Le simple contact des corps dégage de la chaleur; la compression, le frottement, la percussion, et tous les changements mécaniques que peuvent éprouver les molécules matérielles dégagent pareillement de la chaleur ou du froid. Enfin les combinaisons chimiques, soit les combinaisons naturelles qui accompagnent la naissance, le développement et la décomposition des êtres, soit les combinaisons accidentelles, qui sont des produits de l'art, sont autant de phénomènes de production de chaleur ou de froid, dont il importe de connaître les lois.

PREMIÈRE PARTIE.

DILATATION.

CHAPITRE PREMIER.

CONSTRUCTION DU THERMOMÈTRE À MERCURE.

149. La construction du thermomètre à mercure se réduit à un petit nombre d'opérations qui sont faciles à exécuter. Il faut préparer le tube, introduire le liquide, fermer le thermomètre et le graduer.

150. Les tubes de thermomètre doivent avoir un diamètre intérieur qui soit partout le même, afin que des longueurs égales correspondent à des volumes égaux. Pour s'assurer de cette condition, on fait passer, dans l'intérieur du tube que l'en veut employer, une petite colonne de mercure de 1 ou 2 centimètres de longueur; ensuite, par une inclinaison convenable, ou par une légère pression que l'en peut exercer avec une vessie de gomme élastique, on fait courir cette colonne d'un côté ou de l'autre, jusqu'à ce qu'elle ait parcouru toute l'étendue du tube (Fig. 168). Si, dans chaque position, elle occupe la même longueur, on est très sûr que le tube est partout d'un diamètre égal; et, pour l'employer à la construction d'un thermomètre, il ne reste plus qu'à y souffler une boule (Fig. 169), ou à y sceller un réservoir cylindrique (Fig. 160).

Lorsqu'on veut employer un tube inégal, il faut le *calibrer*, c'est-à-dire marquer sur toute sa longueur des intervalles successifs qui correspondent à des volumes égaux. Cette opération est délicate; mais, au moyen de la disposition qui est représentée figure 168, on parvient à la faire avec une grande exactitude.

151. Pour introduire le liquide, on chauffe la boule afin d'en dilater l'air, et ensuite on plonge rapidement l'extrémité du tube dans un bain de mercure. Le refroidissement qui a lieu diminue l'élasticité de l'air intérieur, et la pression atmosphérique force le liquide à monter de plus en plus; il suffit qu'il en arrive seulement quelques gouttes dans le réservoir (Fig. 161). Alors, retournant l'appareil pour chauffer de nouveau la boule, on la chauffe jusqu'à faire bouillir le liquide qu'elle contient; les vapeurs de mercure remplissent bientôt toute la capacité de la boule et du tube; l'air est complètement chassé, et cette fois, en plongeant très vite l'extrémité du tube dans le bain de mercure (Fig. 162), on est presque assuré qu'il ne res-

tera pas la moindre trace d'air ni de vapeur d'eau dans tout l'intérieur de l'appareil. Cependant, si l'en apercevait encore, soit dans le réservoir, soit dans la longueur du tube, la plus légère bulle d'air, il faudrait recommencer l'ébullition et le retournement.

152. Avant de fermer le thermomètre, on en *régle la course*, c'est-à-dire que l'en fait sortir ou rentrer du liquide jusqu'à ce que le sommet de la colonne corresponde à peu près à la hauteur que l'on veut choisir pour la température moyenne; ensuite on ferme à la lampe l'extrémité du tube. Cette opération se fait de deux manières : 1^{re} en faisant le vide au-dessus de la colonne thermométrique; 2^{re} en y laissant de l'air. Dans le premier cas, on commence par effiler l'extrémité du tube, et, après cela, on chauffe la boule sur des charbons jusqu'au point de faire sortir une petite goutte de liquide. A cet instant même, on dirige le dard du chalumeau (Fig. 163) sur l'extrémité du bec effilé du tube; le verre se fond et le tube est fermé; il ne reste plus qu'à l'arrondir en le présentant au dard de la lampe après que la colonne n'est retirée par le refroidissement.

Dans le second cas, le thermomètre étant à la température *ambiante*, c'est-à-dire à la température de l'air environnant, on présente l'extrémité du tube au dard de la lampe, et en la ferme hermétiquement; ensuite on la maintient rouge et à peu près en état de liquéfaction pendant quelques instants, et alors, chauffant rapidement la boule, soit avec la main, soit avec une lampe, la colonne monte, l'air est repoussé, et par la pression qu'il exerce au sommet du tube sur le verre fondu, il ferme une espèce de réservoir qui est plus ou moins grand, suivant que l'air y est refoulé avec plus ou moins de force (Fig. 166 et 167). Ce réservoir supérieur est toujours nécessaire lorsqu'on laisse de l'air quand le tube thermométrique est très fin : sans pression supérieure, la colonne se divise à chaque instant.

153. La graduation du thermomètre consiste à marquer les *deux points fixes*, et à diviser en parties égales l'intervalle qui les sépare. Les points

fixes qui sont généralement adoptés sont celui de la glace fondante et celui de l'eau bouillante. Pour marquer le point de la glace fondante, on plonge dans un vase rempli de glace pilée (Fig. 164) la boule du thermomètre et toute la partie de la tige dans laquelle il se trouve du liquide. La température ambiante étant plus haute que 0, la glace fond peu à peu, et toute la masse se maintient à la température fixe de la glace fondante. Après quelques instants, le thermomètre a pris cette température : il reste parfaitement stationnaire, et l'on marque le point précis où il se trouve ; ou le marque sur le tube d'abord à l'encre, et ensuite on y fait un trait au diamant : c'est le 0 ou le point de départ de notre échelle thermométrique.

Pour marquer le point de l'ébullition, on prend un vase à long col (Fig. 165), dans lequel on fait bouillir de l'eau distillée ; après quelques instants d'ébullition, la vapeur en a échauffé également toutes les parties, et elle s'échappe par les ouvertures latérales ; alors le thermomètre est enveloppé de toutes parts d'un bain de vapeur, dont la température est partout la même et partout égale à la température de la première couche d'eau bouillante. Bientôt la colonne arrive à un point fixe, qu'elle ne peut plus dépasser ; c'est le point d'ébullition ; on le marque d'abord à l'encre et ensuite au diamant. Si, au moment de l'expérience, la hauteur du baromètre était sensiblement différente de 760^{mm}, il faudrait faire une correction, dont nous donnerons la valeur en parlant de l'ébullition.

L'intervalle des deux points de la glace fondante et de l'eau bouillante est divisé en 100 degrés ou en 100 parties égales ; les divisions sont continuées au-dessus et au-dessous de ces points, et leur ensemble forme l'échelle thermométrique. Quand les divisions sont marquées au diamant sur le tube lui-même, on dit que le tube porte son échelle ; mais le plus souvent les divisions sont marquées sur une monture en bois, en ivoire, en verre ou en métal ; il faut alors fixer le thermomètre sur sa monture, de manière que les points de la glace et de l'eau bouillante qui sont marqués sur la tige correspondent très exactement et d'une manière permanente aux points 0 et 100 qui sont marqués sur l'échelle divisée de la monture.

154. Tous les thermomètres à mercure, construits d'après ces principes, sont des instruments comparables, c'est-à-dire qu'ils marchent ensemble, et indiquent en même temps le même nombre de degrés. En effet, deux volumes d'un même corps étant pris à 0, si on les porte à une autre température, de telle sorte que l'un d'eux se dilate, par exemple, de la millièmième partie de son volume à 0, l'autre se dilatera aussi de la millièmième partie de son volume à 0 ; par conséquent deux thermomètres à mercure doivent marquer en même temps 1°, 2°, 3°, etc., parce qu'ils doivent prendre en même temps le centième, les 2 centièmes, les 3 centièmes, etc.,

de l'accroissement de volume qu'ils sont susceptibles de prendre en passant de 0 à 100°.

Cependant ce raisonnement n'est vrai qu'en supposant le mercure contenu dans des vases ou dans des enveloppes solides de même nature ; car, dans les thermomètres, ce n'est pas la dilatation absolue du mercure que l'on observe, mais sa dilatation apparente, c'est-à-dire la différence qui existe entre l'accroissement de volume du mercure et l'accroissement de capacité de l'enveloppe qui le contient. Si le verre se dilatait autant que le mercure, le thermomètre resterait stationnaire à toutes les températures ; et même si l'enveloppe du verre se dilatait plus que le liquide qu'elle contient, les augmentations de chaleur feraient baisser le thermomètre, au lieu de le faire monter. Pour que les thermomètres soient rigoureusement comparables, il faut donc que leurs enveloppes soient également dilatables.

155. On peut construire des thermomètres à mercure qui marquent jusqu'à 3 ou 4 cents degrés, mais il est impossible de les faire aller plus loin, soit parce que à ces hautes températures le verre offre moins de résistance, soit ainsi parce que le mercure donne alors des vapeurs abondantes qui vont se condenser dans les parties froides, ou qui pressent le tube au point de le briser. Au-dessous de 0, le thermomètre à mercure ne donne des indications justes que jusqu'à — 30 ou — 35° ; car il approche alors de son point de congélation, qui est vers — 40, et au changement d'état, tous les corps éprouvent des modifications très brusques.

156. Pour les recherches, et même pour les observations auxquelles on veut donner quelque exactitude, il convient d'employer des thermomètres qui n'aient que 15 ou 20 degrés de course : l'un marquant, par exemple, les températures depuis + 10 à — 5, un autre de — 5 à — 20, un autre de + 10 à + 25, etc. ; alors les réservoirs ne contiennent que très peu de mercure, les tubes sont d'un diamètre intérieur excessivement fin, et chaque degré occupe une grande longueur. Ces thermomètres ont le double avantage de prendre rapidement la température, et de l'indiquer avec une grande précision. Pour les graduer, il est nécessaire d'avoir un thermomètre étalon, c'est-à-dire un thermomètre gradué à la glace fondante et à l'eau bouillante, et de l'exactitude duquel on soit parfaitement assuré.

M. Bellani a observé que le 0 des thermomètres à mercure s'élève avec le temps, comme si la boule devenait plus petite. Déjà, en 1817, MM. Gay-Lussac et Arago avaient remarqué que le 0 du thermomètre des caves de l'Observatoire s'était élevé de 0,38. M. Pictet, M. Flaugergues et plusieurs autres physiciens ont reconnu la vérité de cette observation importante. Quelquefois la variation s'élève jusqu'à plus de deux degrés. On ne sait pas encore d'une manière certaine si ce phénomène dépend d'une portion d'air qui se dissoudrait

daus le mercure pour eu augmenter le volume, ou s'il dépend de la pression atmosphérique, qui pourrait, à la longue, en comprimant le verre de la boule, lui donner une moindre capacité. S'il reste

quelque doute sur la vraie cause du fait, il n'en reste aucun sur le fait lui-même, et il importe que tous les observateurs s'astreignent à vérifier souvent les graduations de leurs thermomètres.

CHAPITRE II.

FORMULES DE DILATATION.

157. Nous donnerons séparément les formules de la *dilatation linéaire* et celles de la *dilatation cubique*.

La *dilatation linéaire* d'un corps est la dilatation qu'il éprouve dans sa longueur, ou, plus généralement, la dilatation qu'il éprouve dans une seule de ses dimensions.

La *dilatation cubique* est la dilatation en volume. Concevons, par exemple, un cube dont toutes les arêtes aient une longueur de 1 mètre à la température 0, et supposons qu'on le porte de 0 à une autre température quelconque : par la dilatation, chacune des arêtes va s'allonger, et le volume total va aussi augmenter; l'allongement des arêtes sera la dilatation linéaire, et l'augmentation de volume sera la dilatation cubique. Chacune des arêtes devenant, par exemple, $1 + l$, le volume deviendra $(1 + l)^3$ ou $1 + 3l + 3l^2 + l^3$, ou simplement $1 + 3l$; parce que la dilatation linéaire est toujours une si petite fraction de la longueur primitive, qu'il est permis d'en négliger le triple carré $3l^2$, et à plus forte raison le cube l^3 . Ainsi la *dilatation cubique* est triple de la *dilatation linéaire*.

On dit que la dilatation est uniforme, par rapport au thermomètre à mercure, lorsqu'elle est la même pour chaque degré de ce thermomètre, de telle sorte que l représentant la dilatation linéaire pour 1° , dans le cas de la dilatation uniforme, $2l$ sera la dilatation pour 2° , et tl la dilatation pour t° ; de même, $2k$ étant la dilatation cubique pour 1° , $2k$ sera la dilatation pour 2° , et en général tk la dilatation pour t° .

158. Désignons par l la dilat. linéaire d'un corps, par l° sa longueur à la tempér. 0, par l^t sa longueur à la tempér. t° , en admettant que la dilatation soit uniforme, nous aurons une relation entre ces quatre quantités, l , t , l° , l^t , au moyen de laquelle, trois de ces quantités étant données, il sera facile de trouver la quatrième.

Puisqu'un corps, dont la longueur est 1 à la température 0, prend une longueur $1 + tl$ à la température t , il est évident que les longueurs l° et l^t seront entre elles comme les longueurs correspon-

dautes de l'unité, c'est-à-dire que l'on a la proportion fondamentale

$$l^\circ : l^t :: 1 : 1 + tl,$$

D'où il résulte,

$$1^\circ. \quad l^t = l^\circ (1 + tl),$$

ce qui peut être traduit ainsi : pour avoir la longueur l^t d'un corps à la température t , il faut multiplier sa longueur à 0 par l'unité augmentée de t fois la dilatation linéaire de sa substance pour 1° ;

$$2^\circ. \quad l^\circ = \frac{l^t}{1 + tl};$$

pour avoir la longueur l° d'un corps à la température 0, il faut diviser la longueur qu'il a à la température t par l'unité augmentée de t fois la dilatation linéaire de sa substance pour 1° ;

$$3^\circ. \quad 1 + tl = \frac{l^t - l^\circ}{l^\circ} \text{ ou } tl = \frac{l^t - l^\circ}{l^\circ}$$

en tirant la valeur de t , on aura

$$t = \frac{l^t - l^\circ}{l^\circ l}$$

ce qui donne la température, au moyen de la longueur à 0, de la longueur dilatée et de la dilatation linéaire.

4°. En tirant la valeur de l , on aura

$$l = \frac{l^t - l^\circ}{t l^\circ},$$

ce qui donne la dilatation linéaire, au moyen de la longueur à 0, de la longueur dilatée et de la température.

5°. l^t et l^t' étant deux longueurs dilatées d'un même corps aux températures t et t' , $1 + tl$ et $1 + t'l$ étant les deux longueurs de l'unité correspondantes aux mêmes températures, on aurait pareillement

$$l^t : l^t' :: 1 + tl : 1 + t'l,$$

$$\text{d'où} \quad l^t = l^t' \frac{1 + t'l}{1 + tl},$$

c'est la formule rigoureuse pour avoir une longueur à la température t' , au moyen d'une autre longueur à la température t , sans passer par la longueur à 0.

Quelquefois on peut employer la formule plus simple

$$l' = l [1 + t(t' - t)],$$

qui n'est qu'une formule d'approximation.

159. Nous aurons des formules tout-à-fait semblables pour la dilatation cubique, t étant le volume d'un corps à 0, et k la dilatation cubique de sa substance pour 1°, à 1° le volume sera $1 + k$, à 2° il sera $1 + 2k$, et en général à t ° il sera $t + tk$.

D'après cela, v_0 étant un autre volume quelconque de la même substance pris à 0, et v_t le volume dilaté pour la température t , ces deux volumes seront entre eux comme les volumes correspondans de l'unité : ce qui donne la proportion fondamentale

$$v_0 : v_t :: 1 : 1 + tk;$$

d'où l'on tire, comme pour la dilatation linéaire,

$$1^{\circ}. \quad v_t = v_0 (1 + tk),$$

ce qui donne le volume dilaté, au moyen du volume à 0;

$$2^{\circ}. \quad v_0 = \frac{v_t}{1 + tk},$$

ce qui donne le volume à 0, au moyen du volume dilaté;

$$3^{\circ}. \quad t = \frac{v_t - v_0}{k v_0},$$

ce qui donne la température, au moyen du volume à 0, du volume dilaté et de la dilatation cubique;

$$4^{\circ}. \quad k = \frac{v_t - v_0}{t v_0}$$

ce qui donne la dilatation cubique, au moyen du volume à 0, du volume dilaté et de la température;

5°. On a pareillement, entre deux volumes dilatés, v_t et $v_{t'}$, et les deux volumes correspondans de l'unité pour les températures t et t' , cette proportion

$$v_t' : v_t :: 1 + t'k : 1 + tk,$$

$$\text{d'où l'on tire} \quad v_t' = v_t \frac{1 + t'k}{1 + tk},$$

ou par approximation $v_t' = v_t (1 + k(t' - t))$.

160. Toutes ces formules sont nécessaires pour les calculs de réduction de température; il suffira de s'exercer sur quelques exemples particuliers, pour n'avoir plus aucune difficulté à les employer.

CHAPITRE III.

DE LA DILATATION DES GAZ.

161. C'est à M. Gay-Lussac que nous devons la détermination exacte de la dilatation des gaz. Son appareil est représenté figure 170; il se compose d'une caisse en fer-blanc ss' , qui repose sur un fourneau v' ; deux ouvertures latérales et opposées v et v' sont destinées à recevoir, l'une un thermomètre à mercure bst , l'autre le tube à air $b' d'$; ces deux instrumens sont dans la même couche horizontale, à quelque distance au-dessous du niveau mn du liquide contenu dans la caisse. Le couvercle cc' est percé de trois ouvertures; deux donnent issue à la vapeur, et celle du milieu reçoit un thermomètre vertical, dont la boule b'' descend au même niveau que les boules b et b' . Tout l'appareil peut être mis à la température 0, et ensuite élevé graduellement de degré en degré jusqu'à la température de l'ébullition de l'eau; ensuite, pour faire une contre-épreuve, on peut le laisser refroidir lentement, et redescendre du point d'ébullition, en passant par les mêmes degrés. Chaque

température doit être maintenue fixe pendant assez long-temps pour que l'on puisse observer les thermomètres et le tube à air $b' d'$.

162. Voici maintenant les données d'où l'on peut conclure la dilatation. Le tube à air $b' d'$ (Fig. 172) est un tube gradué, c'est-à-dire qu'il est divisé en parties de capacités égales, et que l'on connaît le nombre de ces parties qui sont contenues dans la boule, à une température donnée. De d en d' il y aura, par exemple, 100 parties, et l'on saura qu'à la température 0, la boule et le tube jusqu'en d contiennent 1000 de ces parties. Par la dilatation, chacune de ces parties va s'agrandir; mais, la dilatation étant uniforme, chacune s'agrandira de la même quantité; elles resteront égales, et le volume dilaté de la boule, jusqu'en d , contiendra encore dix fois le volume dilaté du tube, de d en d' . Il suffit d'introduire dans ce tube de l'air parfaitement sec, et d'en déterminer à chaque instant le volume, la pression et la température. Pour y introduire

l'air sec, on le remplit d'abord de mercure, et on l'adapte à un tube plus large (Fig. 171), contenant des fragments de marbre de chaux; un fil de fer *f*, que l'on peut enfoncer ou retirer, traverse le grand tube, pénètre dans le petit, et peut même arriver jusqu'à la boule. En inclinant un peu l'appareil, le mouvement du fil fait tomber successivement des gouttes de mercure, et l'air sec du grand tube passe pour en prendre la place. On arrête l'opération, lorsqu'il ne reste plus qu'une petite colonne de mercure *s*, qui doit servir d'index.

C'est alors que l'on dispose le tube dans la caisse de fer-blanc, comme il est représenté (Fig. 170.)

Le volume de l'air intérieur est donné par la position de l'index.

La pression est donnée par la hauteur du baromètre, que l'on observe avec soin pendant toute la durée de l'expérience.

Enfin sa température est donnée par les deux thermomètres *bt* et *b' f'*; car on prend toutes les précautions nécessaires pour que la couche horizontale *vv'* soit à la même température dans toute son étendue, et l'on a grand soin de retirer ou d'enfoncer les tiges des thermomètres et celle du tube à air, pour que l'on puisse apercevoir seulement dans chaque observation l'extrémité des colonnes thermométriques et celle de l'index.

Lorsque la température s'élève, le volume de l'air augmente; il occupe dans le tube un plus grand nombre de divisions, et chacune de ces divisions est elle-même plus grande, à cause de la dilatation du verre. On peut donc, en faisant les corrections convenables, déterminer pour chaque degré de température le volume correspondant de l'air, et conclure sa dilatation.

M. Gay-Lussac a démontré de cette manière :

1° Que la dilatation de l'air est uniforme depuis 0 jusqu'à 100°;

2° Qu'elle est pour chaque degré la 267^e partie, ou les 0,00375 du volume à 0;

3° Que tous les gaz se dilatent uniformément comme l'air, et que, pour tous, le coefficient de dilatation reste le même; il est toujours pour chacun d'eux les 0,00375 du volume à 0.

Tandis que M. Gay-Lussac, en France, découvrait ces lois remarquables, M. Dalton, à Manchester, parvenait au même but.

103. MM. Dulong et Petit ont étudié la dilatation des gaz pour des températures plus basses que 0 et plus hautes que 100°. Ce travail a été le point de départ de ces habiles physiciens, dans les recherches qu'ils ont faites sur la chaleur, et qui constituent les plus belles découvertes expérimentales dont la théorie de la chaleur se soit enrichie dans ces derniers temps.

Depuis 0 jusqu'à — 36°, la dilatation de l'air rapportée au thermomètre à mercure est encore uniforme et la même qu'entre 0 et 100°. Au-dessous de — 36, le mercure est trop près du sou-

point de congélation pour qu'on puisse l'employer à la mesure des températures.

Depuis 100° jusqu'à 360°, la dilatation de l'air devient décroissante, quand on la rapporte au thermomètre à mercure; c'est-à-dire que pour chaque degré, et par conséquent pour chaque accroissement égal de volume que prend le thermomètre, l'air prend des accroissements de volume qui deviennent de plus en plus petits. Réciproquement, au-dessus de 100°, les dilatations du mercure sont croissantes, par rapport aux dilatations de l'air. D'après cela il semble qu'on doive être fort embarrassé de décider entre le mercure et l'air, pour savoir auquel des deux appartient l'irrégularité. Mais si l'on considère que tous les gaz se comportent exactement comme l'air, et que d'ailleurs l'état gazeux a en lui-même quelque chose de plus permanent que l'état liquide, qui n'est qu'un état passager, on comprendra facilement que c'est la dilatation de l'air qu'il faut prendre pour type, et que c'est à elle qu'il faut rapporter les dilatations de tous les corps. Nous reviendrons sur ce sujet dans le chapitre VII, en traitant de la comparaison que l'on peut faire des diverses échelles thermométriques. Mais, dès ce moment, nous allons rapporter le tableau des comparaisons qui ont été faites par MM. Dulong et Petit, de la marche relative des thermomètres à air et à mercure, depuis la température de 100° jusqu'à la température de 360°, qui est celle de l'ébullition du mercure.

TEMPÉRATURES indiquées par le thermomètre à mercure, à enveloppe de verre.	TEMPÉRATURES indiquées par un thermomètre à air, et corrigées de la dilatation du verre.	VOLUMES correspondants d'une même masse d'air
— 56°	— 36°	0,8650
0	0	1,0000
100	100	1,3750
150	148,70	1,5576
200	197,05	1,7389
250	245,05	1,9189
300	292,70	2,0976
Ébul. du m. 360	350,00	2,3125

La première colonne représente les températures indiquées par le thermomètre à mercure.

La seconde colonne représente les températures correspondantes indiquées par un thermomètre à air, que l'on suppose gradué comme le thermomètre à mercure; c'est-à-dire que l'intervalle entre la glace fondante et l'eau bouillante est divisée en 100 parties égales, et que les divisions sont prolongées au-dessus et au-dessous de ces points. Seulement les degrés du thermomètre à mercure dépendent de la dilatation du mercure et de celle du verre qui lui sert d'enveloppe, tandis que les degrés

du thermomètre à air sont corrigés de la dilatation du verre, que nous supposons connue.

La troisième colonne représente les volumes successifs que prend une même masse d'air sec, sous la même pression, en passant de la température 0, où son volume est égal à l'unité, aux températures qui sont exprimées dans les deux autres colonnes, soit en degrés du thermomètre à mercure, soit en degrés du thermomètre à air.

On voit que le thermomètre à air et le thermomètre à mercure sont parfaitement d'accord depuis -36° jusqu'à $+100^{\circ}$; mais qu'au-dessus de 100, le thermomètre à mercure prend l'avance; il marque 200, quand le thermomètre à air ne marque que 197,95: ce qui fait une différence d'environ 3; cette différence est plus que double, en passant de 200 à 300; et enfin elle est de 10° , en passant de 100 à 360, puisque le thermomètre à air ne marque alors que 350.

164. L'appareil que MM. Dulong et Petit ont employé pour parvenir à ces résultats est représenté *Fig. 156*, 157 et 158; il se compose d'une caisse rectangulaire en cuivre rouge, de 7 décimètres de longueur, de 1 décimètre de largeur et de 1 décimètre de profondeur, que l'on remplit d'une huile fixe, et que l'on ajuste sur un fourneau propre à en chauffer également toutes les parties. On en voit la coupe verticale dans la *Fig. 157*, et le plan ou la coupe horizontale dans la *Fig. 158*. Le couvercle est percé de plusieurs trous, les uns destinés à recevoir des thermomètres, les autres des tiges armées de volans, qui mélangent le liquide par leur rotation, et qui établissent partout l'uniformité de température. L'une des petites faces latérales est percée de deux ouvertures de même grandeur et au même niveau: la première reçoit un thermomètre horizontal *bt*, et la seconde le tube à air *ca'*, qui est aussi horizontal; ces deux instrumens sont dans la même coupe de niveau, et la boule *b* du thermomètre correspond au milieu *a* de la longueur du tube. Avec cet appareil la dilatation de l'air a été observée de deux manières, par la mesure des volumes, et par la mesure des pressions.

165. *Dilatation de l'air par la mesure des volumes.* — Pour suivre ce procédé, on termine le tube à air *ca'* par un bec très fin *c'*, qui doit sortir de la caisse de cuivre (*Fig. 157* et 158). Ce tube étant rempli d'air sec, on le laisse ouvert, ou le dispose dans l'appareil, on verse l'huile fixe qui doit être échauffée, et l'on élève graduellement la température. Lorsqu'on approche du degré de chaleur que l'on veut atteindre, on ferme le fourneau. La température monte encore; elle arrive à un *maximum* où elle reste stationnaire pendant quelques instans; et c'est alors que l'on fait les trois opérations d'où dépend le succès de l'expérience: on observe le ther-

momètre à mercure, on observe le baromètre, et en même temps on ferme au chalumeau le bec *c'* du tube à air. Ensuite, l'appareil étant refroidi, on enlève le tube à air, on le porte dans un appartement dont la température est connue, on le retourne verticalement, la pointe *eo* bas, dans une cuvette à mercure, et l'on brise l'extrémité du bec; l'air refroidi n'ayant plus qu'une tension moindre que la pression atmosphérique, le mercure monte jusqu'à une certaine hauteur, que l'on mesure avec beaucoup de soin. Après cela on fait trois pesées: 1^o on pèse le tube et tout le mercure qu'il contient; 2^o on pèse le tube sans mercure; 3^o on pèse le tube rempli de mercure; de cette dernière pesée, retranchant successivement la première et la deuxième, on a les poids des deux volumes de mercure: le premier égal au volume d'air refroidi, le second égal au volume total du tube, et par conséquent égal au volume d'air chaud qui le remplissait au moment où il a été fermé au chalumeau. En corrigeant ces résultats de la dilatation du verre et de la différence des pressions, l'on arrive enfin au rapport exact qui se trouve entre le volume de l'air chaud et le volume de l'air froid; d'où l'on conclut la dilatation de l'air.

166. *Dilatation de l'air par la mesure des pressions.* — Pour suivre ce second procédé, on prend le tube à air qui est représenté dans la *Figure 156*; ce tube s'ajuste comme le premier; seulement sa partie recourbée descend verticalement. On chauffe comme la première fois, et lorsqu'on est arrivé au *maximum* de température, au lieu de fermer l'extrémité du tube à air, on lui présente une petite capsule de mercure, et on laisse refroidir l'appareil. La tension de l'air diminuant, le mercure monte dans la branche verticale, et l'on mesure avec beaucoup de soin la hauteur à laquelle il s'arrête quand la température du refroidissement est devenue stationnaire; de cette manière, en faisant la correction convenable, on connaît le volume et la pression de l'air chaud, le volume et la pression de l'air froid, et l'on en déduit la dilatation.

Les résultats de ces deux procédés se confirment l'un par l'autre, car ils s'accordent parfaitement entre eux, et montrent en même temps que la loi de Mariotte s'étend à toutes les températures.

L'hydrogène, qui est de tous les gaz celui qui diffère le plus de l'air atmosphérique, par sa constitution et par la plupart de ses propriétés, a cependant donné les mêmes résultats, soit pour l'uniformité, soit pour la quantité de sa dilatation.

167. M. de Laplace explique ces résultats et les autres propriétés essentielles des gaz dans sa belle théorie des fluides élastiques, qui forme un des derniers livres de la Mécanique céleste.

CHAPITRE IV.

DE LA DILATATION ABSOLUE DU MERCURE, ET DE LA DILATATION APPARENTE DE QUELQUES AUTRES LIQUIDES.

168. MM. Dulong et Petit ont déterminé la dilatation absolue du mercure avec une grande précision. Leur appareil, qui est représenté *Fig. 191*, 192, 193, 194 et 195, repose sur ce principe d'hydrostatique (65), que deux colonnes liquides qui se font équilibre ont des hauteurs qui sont en raison inverse de leurs densités.

AT et A'T', *figura 195*, sont deux tubes verticaux, communiquant par le tube horizontal TT'. On les remplit de mercure jusqu'à la hauteur mm'; l'action capillaire est nulle à cause de la grandeur des diamètres, et l'égalité des pressions s'établit parfaitement, quoique le tube TT' soit très étroit. Cet appareil repose sur une règle de fer TT', qui repose elle-même sur une forte table en bois, que l'on met de niveau par le moyen des vis calantes rr'. Deux montants de fer f et f', portant des anneaux à clavette ac et ac', maintiennent les tubes dans une position bien verticale. Le montant f est terminé par un arc de fer, dont l'extrémité r doit servir de repère.

L'une des branches est maintenue à la température 0, l'autre est portée successivement à différentes températures; et tout se réduit dans ces recherches à mesurer exactement les hauteurs inégales des deux colonnes, et la température de la colonne dilatée.

169. Les hauteurs des colonnes au-dessus de l'axe du tube TT' se déterminent par un micromètre particulier, représenté *figure 192*; il se compose d'une forte règle divisée, sur laquelle se meut une lunette. Cet appareil se dispose en x sur un pied solide en maçonnerie: la règle est verticale, la lunette horizontale; et l'on observe la course que doit prendre la lunette pour pointer successivement au repère r et aux sommets des deux colonnes. Connaissant, une fois pour toutes, la hauteur du repère au-dessus de l'axe du tube TT', on en déduit les hauteurs du sommet de la colonne froide et du sommet de la colonne dilatée, au-dessus du même axe.

170. Les températures se déterminent par la disposition qui est représentée *figure 191*. Un cylindre cc enveloppe le tube AT; on le remplit de glace pilée, et, au moyen de la petite feuillère o, on peut pointer la lunette au sommet de la colonne. La température du montant f restant la même, le re-

père r reste parfaitement fixe. Un cylindre c'c' enveloppe pareillement le tube A'T'; on le remplit d'une huile fixe qui supporte plus de 200°, sans bouillir. Un fourneau, dont on a supprimé la figure dans toute la partie antérieure, sert à la chauffer à divers degrés. Deux thermomètres t et t' servent à marquer la température du bain d'huile, et par conséquent celle du mercure. Le premier t est un thermomètre à air, que nous avons décrit (106); le second t' est un thermomètre à mercure d'une espèce particulière; par la dilatation, le mercure s'échappe dans la petite capsule s: on le recueille, on le pèse, on compare son poids à celui du mercure qui est contenu dans le tube à la température 0, et en faisant les corrections nécessaires pour la dilatation du verre, en en déduit la température, comptée sur le thermomètre à mercure. Les températures et les hauteurs des colonnes s'observent rapidement, lorsqu'on a fermé toutes les issues du fourneau, et pendant l'état maximum, qui dure plusieurs instans.

171. Nous avons vu (169) que la dilatation cubique est donnée par la formule

$$K = \frac{v_1 - v_0}{t \cdot v_0}.$$

Ici nous connaissons t, et nous n'avons besoin de connaître ni v₁ ni v₀; car les volumes sont en raison inverse des densités, et dans notre appareil les densités sont en raison inverse des hauteurs des colonnes; donc les volumes sont comme les hauteurs des colonnes, et n, désignant la hauteur de la colonne du tube AT, qui est à la température 0, n₁ désignant la hauteur de la colonne du tube A'T' pour la température t, nous aurons

$$\begin{aligned} \frac{v_1}{v_0} &= \frac{n_1}{n_0} \\ \frac{v_1 - v_0}{v_0} &= \frac{n_1 - n_0}{n_0} \end{aligned}$$

d'où

$$\frac{n_1 - n_0}{t \cdot n_0}.$$

et par conséquent K =

C'est par ce moyen que MM. Dulong et Petit sont parvenus aux résultats suivans pour la dilatation cubique du mercure.

TEMPÉRATURES déduites de la dilata- tion de l'air.	DILATATIONS INTERMÈDES DU MERCURE, en volume		TEMPÉRATURES indiquées sur la dilata- tion du ther- momètre supposé uniforme.
	en fract. ord.	en fract. décim.	
0°	0 1	0,0	0
100	3550 1	0,00018018	100
200	6475 1	0,00018453	204,61
300	3500 1	0,00018868	314,15

La première colonne contient les températures telles qu'on les déduit du thermomètre à air. La seconde colonne renferme, en fractions vulgaires, et en fractions décimales, les dilatations moyennes absolues du mercure, entre la température 0 et chacune des températures indiquées dans la première colonne. Enfin la troisième colonne comprend les températures qu'on obtiendrait en supposant uniforme la dilatation du mercure, ou, en d'autres termes, celles qu'indiquerait un thermomètre construit avec ce liquide, en le refroidissant dans un vase dont l'expansion suivrait la même loi que la sienne.

172. Nous verrons plus loin que la dilatation cubique du verre des thermomètres est à peu près uniforme, entre 0 et 100° comme celle du mercure, et qu'elle est de 1/38700 ou 0,00002584 pour chaque degré centigrade. La dilatation du mercure entre ces limites étant de 1/5550 ou 0,00018018, il en résulte que la dilatation apparente du mercure dans le verre est de 0,00015434 ou environ 1/6479 pour chaque degré, et 1/65 de 0 à 100°; car la dilatation apparente du mercure dans le verre n'est approximativement que la dilatation absolue de mercure diminuée de la dilatation absolue du verre.

173. La dilatation apparente de l'alcool dans le verre peut s'obtenir en observant la marche d'un thermomètre dont la boule est graduée, c'est-à-dire dont la boule a une capacité connue relativement aux divisions de la tige. Si la boule contient, par exemple, 1000 fois le volume qui correspond à la longueur de 1°, il est évident qu'un accroissement de 1° de température donne une dilatation apparente de 1/1000. Il paraît, d'après les observations les plus exactes, que l'alcool très rectifié se dilate, dans le verre, de 0, 122536, depuis 0 à 100° : ce qui fait environ 1/813 pour la dilatation moyenne correspondante à chaque degré; sur quoi il faut remarquer que la dilatation de l'alcool est loin d'être uniforme, et que cette dilatation moyenne est plus grande que la dilatation des basses températures, et plus petite que les dilatations voisines du point d'ébullition.

174. La dilatation apparente de l'eau dans le verre peut s'observer comme celle de l'alcool. On trouve qu'entre 0 et 100° elle est à peu près de 0,04396.

Nous verrons, en parlant de la densité des liquides, que non seulement la dilatation de l'eau est irrégulière, mais encore qu'elle offre un phénomène curieux de contraction à quelques degrés au-dessus de 0. On voit que la dilatation apparente de l'eau entre 0 et 100° est à peu près triple de celle du mercure, et que celle de l'alcool est à peu près triple de celle de l'eau.

175. M. Gay-Lussac est parti d'un autre principe pour chercher quelque loi générale de la dilatation des liquides; au lieu de compter ces dilatations à partir d'une même température, comme celle de la glace fondante, il a pris pour chacun d'eux son point d'ébullition, et il a observé les contractions qu'ils éprouvent en se refroidissant d'un même nombre de degrés.

L'eau bout à	100°
L'alcool à	78°,41
Le sulfure de carbone à	46°,60
L'éther sulfurique à	35°,56

Ainsi, à ces températures différentes, les molécules de ces divers liquides ont des forces répulsives égales; et les lois de dilatation devant être essentiellement liées aux lois des actions moléculaires, on voit que le plus sûr moyen d'arriver à des résultats généraux est d'étudier les contractions qui correspondent à de mêmes abaissements de température au-dessous du point d'ébullition. On doit remarquer toutefois que, sous d'autres pressions, les points d'ébullition seraient différents et ne conserveraient entre eux ni les mêmes rapports ni les mêmes différences.

La table suivante contient les résultats auxquels est parvenu M. Gay-Lussac.

Table des contractions de 5 en 5 degrés, à partir du point d'ébullition de chaque liquide.

TEMPÉRATURE au-dessous du point d'ébullition.	EAU. Contraction.	ALCOOL. Contraction.	SULFURE DE CARBONE. Contraction.	ETHER. Contraction.
0°	0,00	0,00	0,00	0,00
5	3,54	5,55	6,14	8,15
10	6,61	11,43	12,01	16,17
15	10,51	17,51	17,98	24,16
20	13,15	24,34	23,80	31,83
25	16,06	29,15	29,65	32,14
30	18,85	34,74	35,06	46,42
35	21,52	40,28	40,46	52,06
40	24,10	45,68	45,77	58,77
45	26,50	50,85	51,08	65,48
50	28,56	56,02	56,38	72,01
55	30,60	61,01	61,14	78,38
60	32,42	65,96	66,21	
65	34,02	70,74		
70	35,47	75,48		
75	36,70	80,11		

La première colonne indique les températures

au-dessous du point d'ébullition de chaque liquide, décroissant de 5 en 5°.

Les quatre colonnes suivantes contiennent les contractions apparentes que l'eau, l'alcool, le sulfure de carbone, et l'éther éprouvent dans le verre, en s'abaissant au-dessous de leurs points d'ébullition, d'un nombre de degrés marqué par la première colonne. Le volume est représenté par 1000 pour le point d'ébullition; ainsi à 10° au-dessous, il est de 1000—6,61 pour l'eau, de 1000—11,43 pour l'alcool, de 1000—12,01 pour le sulfure de carbone, et de 1000—10,17 pour l'éther.

« On voit par cette table, dit M. Gay-Lussac, 1° que l'eau se dilate beaucoup moins que l'alcool et le sulfure de carbone, et ces deux liquides beaucoup moins que l'éther; 2° que l'alcool et le sulfure

de carbone se dilatent également: ce n'est que dans les quinze premiers degrés qu'il y a une petite différence entre leurs dilatactions; encore pourrait-elle être attribuée en partie à la difficulté de maintenir la température constante à ces degrés élevés. Dans le reste de l'échelle qui, pour le sulfure de carbone, s'étend à 60° au-dessous de son point d'ébullition, ou à 13°; 4 au-dessous de la glace fondante, la concordance est parfaite. Frappé de ce résultat inattendu, et ne pouvant le rapporter ni à la demi-té ni à la volatilité très différente des deux liquides, j'ai voulu m'assurer s'il ne dépendrait pas de la densité de leurs vapeurs. » Et en effet M. Gay-Lussac a découvert ce résultat très remarquable, que l'alcool et le sulfure de carbone, qui se dilatent également, produisent aussi, à volume égal, des volumes égaux en vapeur.

CHAPITRE V.

DE LA DILATATION DES SOLIDES.

176. On peut déterminer directement la dilatation linéaire des corps solides on leur dilatation cubique. Le premier moyen a paru le plus simple à la plupart des observateurs; et l'on voit en effet qu'il se réduit à transformer les substances solides en barres ou en tiges plus ou moins fortes, de 1 ou 2 mètres de longueur, à porter ces barres à des températures déterminées, et à mesurer les allongemens ou les contractions qu'elles éprouvent.

Pour produire une température connue et parfaitement uniforme dans toute l'étendue d'une barre dont on cherche la dilatation, on la dispose au fond d'une cuve ou d'une espèce d'auge rectangulaire, que l'on remplit ensuite de glace fondante, pour avoir la température 0, et d'une huile fixe ou d'un autre liquide, pour avoir des températures de plus en plus élevées. La barre est placée horizontalement, de peur que son poids ou des pressions inégales ne gênent ses mouvemens de dilatation, et elle repose sur des tubes de verre, comme sur des rouleaux, afin que le liquide puisse l'envelopper de toutes parts, et se renouveler autour d'elle. Tout l'appareil peut être chauffé avec des lampes à l'esprit-de-vin; mais le plus sûr est de l'établir sur un fourneau de briques qui lui conserve pendant long-temps la même température. Des volets servent à brasser et à mélanger le liquide, et des thermomètres disposés en différens points de sa longueur et à diverses profondeurs, servent à marquer la température moyenne à laquelle se fait chaque observation.

Pour observer les allongemens et les contractions de la barre, il y a surtout deux moyens qui paraissent donner le plus grand degré d'exactitude: celui de MM. Lavoisier et Laplace, et celui de Ramsden.

MM. Lavoisier et Laplace faisaient plonger verticalement jusqu'au fond de la cuve une règle de verre, appuyée dans sa partie supérieure contre de fortes traverses en fer, qui étaient elles-mêmes soutenues par des maçonneries en pierres de taille, d'une solidité parfaite. Le tranchant de cette lame de verre était un *talon fixe* contre lequel venait s'arrêter l'une des extrémités de la barre en expérience. A son autre extrémité, où devait se porter tout son allongement, elle était en contact avec un bras de levier très court, qu'elle faisait tourner plus ou moins. Le point d'appui du levier était en dehors, conservant sa température et son immobilité; on pouvait donc agrandir à volonté l'amplitude de la dilatation: en faisant, par exemple, le grand bras du levier, dont on observait les mouvemens, 1000 fois plus long que le petit bras qui était directement pousé, on pouvait apercevoir des dix millièmes ou même des cent-millièmes de millimètre.

Ramsden voulait éviter les frottemens du point d'appui et la flexibilité des bras de levier; pour cela, il faisait sortir la dilatation hors de la cuve par un moyen très ingénieux. A chaque extrémité de ses barres il ajustait une tige verticale inflexible et assez longue pour s'élever au-dessus de l'appareil;

deux points marqués au sommet de ces tiges, et à la même hauteur, donnaient une distance toujours égale à la longueur de la barre. Ainsi la question était réduite à mesurer à chaque instant la distance de ces deux points : ce qui peut se faire de plusieurs manières et avec une grande précision.

177. MM. Dulong et Petit ont employé d'autres moyens qui sont moins directs en apparence, mais qui donnent sans doute, entre des mains habiles, le dernier degré d'exactitude auquel on puisse atteindre. C'est ici la dilatation absolue du mercure, qui est l'élément essentiel de toutes les autres déterminations. Avec cette donnée, à laquelle on arrive, comme nous l'avons vu dans le chap. IV, MM. Dulong et Petit ont cherché d'abord la dilatation du verre et celle du fer.

Pour le verre on prend un tube de 8 décimètres de longueur, contenant environ 700 grammes de mercure ; ce tube est fermé à l'une de ses extrémités, et à l'autre, il est effilé en un bec très fin, dont la capacité peut être négligée, par rapport à la capacité totale. On le remplit de mercure sec et purgé d'air, on le dispose horizontalement dans un bain d'huile fixe, que l'on peut chauffer à volonté ; l'extrémité du bec sort du bain, et une partie du mercure s'échappe par l'effet de la dilatation. Le volume v du mercure, qui sort entre deux températures connues, n'est autre chose que la dilatation apparente du mercure dans le verre, ou $k - k'$; en désignant par k la dilatation absolue du mercure entre ces deux températures, et par k' la dilatation absolue du verre. On a donc

$$v = k - k',$$

$$\text{d'où l'on déduit} \quad k' = k - v.$$

On pourrait obtenir le volume v en le jaugeant à la température 0 , dans un tube gradué ; mais il est plus exact de le déterminer par une pesée. Pour les valeurs de k , elles se déduisent des nombres que nous avons rapportés (171). Il résulte de ces expériences, 1^o que la dilatation cubique du verre est sensiblement uniforme entre 0 et 100° , et qu'elle est pour chaque degré de $1/38700$ du volume à 0 ; 2^o qu'elle va croissant à mesure que la température s'élève, et que la moyenne pour chaque degré est de $1/38300$ entre 0 et 200° , et de $1/38900$ entre 0 et 300° . Des tubes de différentes fabriques ont donné le même résultat.

La dilatation du fer pourrait s'obtenir de la même manière, mais MM. Dulong et Petit ont préféré le moyen suivant. Une tige de fer a été fixée dans l'axe d'un tube pareil à celui de l'expérience précédente, et ensuite, après avoir rempli ce tube de mercure sec et purgé d'air, on l'a porté successivement aux températures de 100 , 200 et 300° ; on a recueilli le mercure qui s'est échappé, et on en a pris le poids. De cette manière, il y a trois corps qui concourent à l'expérience, savoir : le tube de verre, la tige de fer et le mercure qui remplit le

tube ; et il est facile d'avoir leur volume à 0 . Le volume du verre s'obtient par le poids du mercure qu'il peut contenir ; le volume de la tige de fer s'obtient en prenant son poids, et en le divisant par sa densité ; enfin le volume du mercure n'est que la différence des deux premiers. Avec ces données, on déduit facilement la dilatation du fer entre la température 0 et une autre température connue. Par ce procédé, on a l'avantage d'arriver directement à la dilatation cubique, tandis qu'en y arrivant par la dilatation linéaire, on triple l'erreur dont la dilatation linéaire est elle-même susceptible.

On pourrait faire la même expérience sur tous les corps, en prenant soin seulement d'oxyder leur surface pour les soustraire à l'action dissolvante du mercure ; mais, connaissant une fois les dilatations précises de quelques solides, il y a un moyen sûr d'en déduire par comparaison les dilatations de tous les autres ; c'est le moyen de Borda, duquel on a fait une si heureuse application dans la mesure de la méridienne ; il consiste à assembler la règle dont on cherche la dilatation avec une règle d'une autre substance, dont la dilatation soit connue (Fig. 169.) Cet assemblage forme le *pyromètre de Borda*.

Les deux règles sont posées l'une sur l'autre dans toute leur longueur ; elles sont réunies d'une manière invariable, à l'une de leurs extrémités seulement, par une forte traverse en fer, à laquelle elles sont fixées solidement par des vis. Chaque règle porte, à son autre extrémité, une tige de laiton qui s'élève d'abord verticalement, et ensuite se recourbe horizontalement. Les branches horizontales de ces deux pièces additionnelles peuvent glisser l'une sur l'autre, quand les deux règles s'allongent inégalement ; et, sur la ligne où elles se joignent, elles sont divisées en parties égales très petites, de manière que 20 divisions de l'une d'elles soient, par exemple, équivalentes à 19 divisions de l'autre ; celle-ci portant, je suppose, des cinquièmes de millimètre, on pourra, par la coïncidence des divisions, estimer des vingtièmes, des cinquièmes ou des centièmes de millimètre. Cette coïncidence s'observe à la loupe, comme dans les verniers ordinaires. Les règles de MM. Dulong et Petit avaient 12 décimètres de longueur, 25 millimètres de largeur et 4 millimètres d'épaisseur. Une différence de température de 1° produisait un déplacement correspondant à peu près à une partie du vernier. Le pyromètre étant porté, par exemple, de la température 0 à la température de 100° , les deux règles s'allongeaient inégalement, la pièce additionnelle de la plus dilatante glissait sur la pièce additionnelle de l'autre, par exemple, de 100 parties du vernier, qui formaient une longueur absolue de 1 millimètre. Connaissant ainsi la différence des dilatations linéaires des deux règles, connaissant d'ailleurs la dilatation linéaire de l'une d'elles, et sa longueur primitive, il était facile d'en déduire la dilatation linéaire de l'autre.

178. Nous avons réuni dans le tableau suivant les dilatactions qui ont été déterminées par les habiles observateurs.

Tableau des dilatactions linéaires des solides

DÉSIGNATION des SUBSTANCES.	TEMPÉ- RATURE de tempér.	DILATATIONS EN FRACTIONS	
		décimales.	milli- mètres.

Suivant M.M. Lavoisier et Laplace.

Fusilons anglais.	0 à 100°	0,0001568	1,568
Platine (non fondue).	0	0,0003635	3,635
Verre de France avec plomb.	0	0,0007199	7,199
Tuile de verre sans plomb.	0	0,0008732	8,732
Idem.	0	0,0009058	9,058
Idem.	0	0,0009760	9,760
Idem.	0	0,0009730	9,730
Verre de Saint-Gobain.	0	0,0009809	9,809
Acier non trempé.	0	0,0010786	10,786
Idem.	0	0,0010795	10,795
Idem.	0	0,0011760	11,760
Acier trempé jaune, recuit à 85°.	0	0,0013806	13,806
Fer doux forgé.	0	0,0013103	13,103
Fer rond point à la filière.	0	0,0013105	13,105
Os de cheval.	0	0,0016606	16,606
Os du tibia de Paris, recuit.	0	0,0015151	15,151
Idem, non recuit.	0	0,0013518	13,518
Cuivre.	0	0,0017120	17,120
Idem.	0	0,0017120	17,120
Idem.	0	0,0017200	17,200
Cuivre jaune ou laiton.	0	0,0018420	18,420
Idem.	0	0,0018781	18,781
Idem.	0	0,0018970	18,970
Argent au titre de Paris.	0	0,0019068	19,068
Argent de coupelle.	0	0,0019069	19,069
Étain des Indes ou de Suède.	0	0,0019306	19,306
Étain de Falmouth.	0	0,0017298	17,298
Plomb.	0	0,0024830	24,830

Suivant Smeaton

Verre blanc (tubes de barom.).	0 à 100°	0,0006333	6,333
Régule martini d'antimoine.	0	0,0006333	6,333
Acier doux.	0	0,0011800	11,800
Acier trempé.	0	0,0012500	12,500
Fer.	0	0,0013433	13,433
Bismuth.	0	0,0013917	13,917
Cuivre rouge battu.	0	0,0017000	17,000
Cuivre rouge 6 parts, étain 1.	0	0,0018167	18,167
Étain fin.	0	0,0018167	18,167
Cuivre jaune fondu.	0	0,0018167	18,167
Cuivre jaune 16 parts, étain 1.	0	0,0019068	19,068
Fil de laiton.	0	0,0019333	19,333
Métal de miroir de télescope.	0	0,0019333	19,333
Soudure, cuivre 2, zinc 1 part.	0	0,0020833	20,833
Étain fin.	0	0,0020833	20,833
Étain en grains.	0	0,0020833	20,833
Soudure blanche, étain 1 partie, plomb 2.	0	0,0020833	20,833
Zinc 4 parties, étain 1, cuivre 1 part.	0	0,0020833	20,833
Plomb.	0	0,0024830	24,830
Zinc.	0	0,0029167	29,167
Zinc allongé au marteau de 1/2.	0	0,0031083	31,083

Suivant le major-général Roy.

Verre en tube.	0 à 100°	0,0007750	7,750
Verre en verge solide.	0	0,0008033	8,033
Fer forgé (prime de 1).	0	0,0011000	11,000
Acier (vierge d'1).	0	0,0014150	14,150
Cuivre jaune de Hambourg.	0	0,0018167	18,167
Cuivre jaune angl., en forme de verge.	0	0,0018970	18,970
Cuivre jaune angl., en forme d'anneau ou de canal rectang.	0	0,0018950	18,950

Suivant M. Troughton.

Platine.	0 à 100°	0,0009180	9,180
Acier.	0	0,0011890	11,890
Fer tre à la filière.	0	0,0015010	15,010
Cuivre.	0	0,0019180	19,180
Argent.	0	0,0020830	20,830

Suivant M. Wollaston.

Platine.	0 à 100°	0,0008000	8,000
----------	----------	-----------	-------

Suivant M.M. DuLong et Petit.

Platine.	0 à 100°	0,0008750	8,750
Verre.	0 à 100°	0,0008633	8,633
Fer.	0 à 100°	0,0018167	18,167
Cuivre.	0 à 100°	0,0017120	17,120

179. La dilatation des corps solides paraît, en général, très-sensiblement uniforme entre 0 et 100°; mais on peut juger, par les résultats de MM. DuLong et Petit, que pour des températures plus hautes, la dilatation devient toujours irrégulière et toujours croissante.

Dans une certaine étendue de l'échelle thermométrique l'acier trempé se contracte au lieu de se dilater; c'est une exception remarquable qui tient sans doute à l'état forcé où se trouvent les molécules. L'élévation de température leur donne plus de liberté pour se rapprocher et pour prendre la place qu'elles auraient prise, sans le refroidissement subit qui est venu les saisir, et donner à leur ensemble l'état particulier qui constitue la trempe. On peut tirer parti de cette propriété pour beaucoup d'applications utiles.

180. Connaissant les dilatactions linéaires des corps solides, il est facile d'en déduire leurs dilatactions cubiques, et de calculer ensuite tous les changements de volume par lesquels doit passer un corps de forme et de dimensions données. Lorsqu'on examine les effets de la chaleur dans des corps diversément repliés sur eux-mêmes, ou dans des vases de diverses figures, on ne voit pas d'abord s'ils doivent s'agrandir ou se rétrécir, ni dans quel sens ils doivent éprouver ces changements; mais, de l'ensemble des expériences, il paraît résulter ce principe général, qu'un espace quelconque, terminé par des parois d'une substance homogène, se dilate exactement comme se dilaterait une masse solide de même substance et de même forme. Ainsi le volume intérieur d'un tube de verre se dilate, comme le cylindre de verre qui serait capable de le remplir; la capacité intérieure d'une sphère se dilate comme la sphère massive qui la pourrait remplir, etc.

181. La puissance de dilatation d'un corps est égale à la résistance de compression dont il est capable. S'il faut un poids de mille kilogrammes pour réduire la longueur d'une barre de fer verticale autant que la réduirait un abaissement de température de 1°, il est évident qu'en la chargeant à sa partie supérieure du poids de mille kilogrammes et en la chauffant de 1°, la dilatation due à la chaleur compensera la compression due à la charge, et sa longueur restera la même. C'est d'après ce principe que l'on peut juger des efforts prodigieux qu'exercent les corps en se dilatant ou en se contractant. Les liquides étant peu compressibles et

très dilatables sont, de tous les corps, ceux qui peuvent produire les plus grands effets de cette nature. Parmi les corps solides, le fer et la fonte ont pareillement une grande puissance de dilatation : c'est pour cela que dans les grands ouvrages où l'on doit mettre bout à bout des barres de fer sur une longueur de plusieurs centaines de mètres, on les ajuste de distance en distance, pour que l'extrémité d'une barre puisse s'engager dans l'extrémité de la barre suivante, sans la presser. Dans les tuyaux de conduite, l'ajustement est un peu plus difficile; mais on y parvient cependant avec des lames de plomb, dont on enveloppe l'extrémité du tuyau qui doit s'engager dans l'extrémité plus large du tuyau suivant.

182. La puissance de contraction des solides est égale à la résistance de traction qu'ils peuvent opposer. S'il faut un poids de mille kilogrammes pour donner à une barre de fer verticale un allongement égal à celui qu'elle prendrait pour une augmentation de température de 1° , il est évident que, si on la charge à son extrémité inférieure du poids de mille kilogrammes, et qu'en même temps on la refroidisse de 1° , la contraction du refroidissement compensera l'allongement de la traction, et la longueur restera la même que si la barre n'était ni refroidie de 1° ni tirée par mille kilogrammes. La ténacité du fer étant très grande, on a pu profiter de cette propriété pour exercer des efforts qui auraient en quelque sorte surpassé nos autres moyens mécaniques. C'est ainsi, par exemple, que l'on voit, au conservatoire des arts et métiers, de longues barres de fer, traversant deux murs opposés, et qui ont servi à rapprocher ces murs, malgré l'énorme pression qui les écartait de leur aplomb naturel. C'est à M. Molard que l'on doit cette ingénieuse application des lois du refroidissement. Les barres étant mises en place, on les ébauffait dans toute leur longueur, et, tandis qu'elles étaient dilatées, on serrait des écrous qui étaient en dehors des murs; alors la puissance de contraction, produite par l'abaissement de température, rapprochait invinciblement les deux extrémités des barres, et par conséquent les obstacles qui s'y opposaient.

Comme une barre de métal se rompt sous un effort suffisant, elle se rompt pareillement par la contraction, quand ses extrémités sont tellement arrêtées, qu'elles ne puissent se rapprocher l'une de l'autre dans une proportion convenable. On en voit de trop fréquents exemples dans les longues pièces de métal qui sont mises en œuvre pendant les chaleurs de l'été, et qui ne sont pas scellées avec assez de précautions.

Les ingénieurs ont sans cesse occasion d'appliquer ces principes dans les grandes constructions dont ils sont chargés.

183. *Lame de compensation.* — Cet appareil se compose de deux ou de plusieurs lames de différente nature, qui sont clouées ou soudées dans toute leur longueur (Fig. 173, 174 et 175). Si

l'une de ces lames est de fer et l'autre de cuivre, et qu'elles aient la même longueur à une température donnée, par exemple à 10° , il est évident qu'à 10° la lame de compensation sera droite, et qu'au-dessus et au-dessous de cette température elle sera courbée dans des sens différents. Au-dessus de 10° , le cuivre se dilate plus que le fer f , le cuivre enveloppera le fer dans sa courbure (Fig. 175); au contraire, au-dessous de 10° , le cuivre sera enveloppé par le fer, qui conservera plus de longueur (Fig. 173). Ces lames de compensation peuvent servir à une foule d'usages, et surtout à compenser les montres et les horloges.

184. Tout le monde sait que dans les chronomètres, comme dans les montres, c'est le ressort qui est le moteur, et le balancier qui est le régulateur. Par les changements de température, toutes les pièces sont altérées dans leur volume, et la masse du balancier α (Fig. 189) est portée plus loin ou plus près de l'axe autour duquel elle fait ses oscillations. On conçoit donc qu'en y ajustant des lames de compensation l, l , qui se rapprochent du centre quand le cercle se dilate, et qui s'en éloignent au contraire, quand le cercle se contracte, on puisse atteindre à une assez juste compensation, pour se mettre complètement à l'abri des variations de température. Au lieu de faire porter la compensation directement sur la masse du balancier, on réussit mieux à produire l'isochronisme, en modifiant tantôt l'épaisseur, tantôt la longueur du ressort spiral que le balancier fait mouvoir. C'est ainsi que M. Bréguet sont parvenus à faire des chronomètres d'une précision si surprenante, qu'en comparant leur marche à la marche des étoiles, on trouve que dans le cours d'une année les plus grands écarts de leurs variations diurnes ne s'élèvent pas à $1''$. C'est là, sans doute, le plus haut degré de perfection que l'art puisse donner à la matière dans des appareils si délicats et si compliqués.

185. Nous avons déjà vu (62) que les horloges avancent ou retardent suivant qu'il fait plus froid ou plus chaud, et que, pour obvier à cet inconvénient, il faut empêcher le centre d'oscillation de remonter, quand la tige se refroidit, et de descendre quand elle se réchauffe. Les lames de compensation convenablement ajustées peuvent produire cet effet; il suffit pour cela que leur masse se relève et se rapproche du point de suspension, tandis que la masse de la lentille s'en éloigne, et *vice versa*. Mais le pendule compensateur est d'un usage encore plus sûr et plus commode.

186. *Pendule compensateur.* — Cet appareil est représenté fig. 184. Les deux tiges extrêmes sont de fer : les deux tiges moyennes sont de cuivre. Par la dilatation des premières, le centre d'oscillation descend; au contraire, il est relevé par la dilatation des deux dernières; et, lorsqu'on a la connaissance exacte des variations locales que ces métaux éprouvent, il suffit de quelques tâtonnements pour produire une compensation très exacte. Mais on

conçoit que l'art difficile de l'horlogerie ne se réduit pas à fabriquer des horloges dont les pendules soient bien compensés. Il y a une telle correspondance entre toutes les pièces, une telle action de l'une sur l'autre, qu'il faut en quelque sorte que la compensation se fasse d'elle-même, sur chaque dent et sur chaque pivot des rouages. On sait quelle célébrité Berthoud et Bréguet se sont acquise dans toute l'Europe, et l'on peut juger de la perfection de leurs ouvrages, lorsqu'on sait qu'une pendule de Bréguet, par exemple, soumise à des variations de température, qui vont jusqu'à 13° en 15° au-dessous de 0, peut suivre le cours des astres pendant une année entière, sans se déranger de 1/2 seconde.

187. La dilatation est une loi générale de la matière, et, s'il se trouve des corps qui, sous l'influence de la chaleur, semblent se soustraire à cette loi, on peut juger d'avance que c'est une exception dépendante de quelque circonstance particulière; par exemple, si les substances végétales et animales se retirent sur elles-mêmes au lieu de se dilater, c'est qu'elles perdent par la chaleur quelques fluides, qui sont combinés avec elles d'une manière plus ou moins intime. Il en est de même des terres de différente espèce, qui sont plus ou moins imbibées d'eau; elles semblent se contracter par la chaleur, mais cet effet résulte seulement de ce qu'elles se dessèchent encore plus qu'elles ne se dilatent.

CHAPITRE VI.

DE LA DENSITÉ DES GAZ, DES LIQUIDES ET DES SOLIDES.

188. Nous avons vu (46) que la pesanteur spécifique ou la densité d'un corps est le rapport de son poids à son volume. L'objet qu'on se propose dans la recherche des densités est moins de pouvoir trouver combien pèse un corps, sous un volume donné, que de pouvoir comparer entre elles les densités de tous les corps différens que nous présente la nature. On prend donc pour unité une densité connue, et l'on cherche combien de fois les autres la contiennent. L'unité que l'on choisit pour les gaz est la densité de l'air atmosphérique, parce que l'air se trouve partout, et que partout il se compose des mêmes élémens chimiques, combinés dans la même proportion. L'unité que l'on choisit pour les autres corps est la densité de l'eau distillée, parce que l'eau se trouve aussi partout, et qu'il est facile, en la distillant, de la rendre parfaitement pure. Ensuite le rapport entre la densité de l'air et celle de l'eau donne le moyen d'établir la comparaison entre les densités de tous les corps connus.

189. *Densité des gaz.* — A volume égal, les densités des corps sont entre elles comme leurs poids (45); ainsi, pour avoir les densités des gaz par rapport à l'air, il suffit de peser un volume d'air et un volume égal de tous les autres gaz, à la même température et sous la même pression. On y parvient en prenant un grand ballon de 8 ou 10 litres de capacité, que l'on pèse après y avoir fait le vide, et que l'on pèse ensuite après l'avoir rempli successivement d'air sec et des gaz de différente nature dont on veut avoir les densités. Comme il est impossible de faire le vide parfait, on tient compte, par le calcul, de la petite quantité d'air qui reste; et comme toutes les pesées ne peuvent se faire dans des circonstances exactement pareilles, il y a de nombreuses corrections à faire pour les variations de température, de pression et d'humidité de l'air extérieur.

190. Nous avons rassemblé dans le tableau suivant les densités des gaz et des vapeurs.

Tableau des densités des gaz et des vapeurs.

DÉSIGNATION des FLUIDES ÉLASTIQUES.	densités déterminées par expérience.	densités calculées.	poide de 1 litre à 0° et 760 de pression.	NOMS des OBSERVATEURS.
Air	1,0000		1,2991	
Gaz hydriodique	4,4288	4,3599	5,7719	Gay-Lussac.
chloroxi-carbonique.		5,3990	4,4156	J. Davy.
chlore	2,4216	2,4260	3,2088	Gay et Thénard.
deutoxide de chlore.		2,3255	3,0081	J. Davy.
sulfureux	2,1930		2,8489	H. Davy.
cyanogène.	1,8064	1,8197	2,5467	Gay-Lussac.
protoxide d'azote.	1,5269	1,5269	1,9752	Colin.
acide carbonique.	1,5245		1,9805	Berzel. et Dulong.
hydro-chlorique.	1,2474	1,2474	1,6205	Biot et Arago.
hydro-sulfurique.	1,1912		1,5475	Gay et Thénard.
oxigène.	1,1026		1,4323	Berzel. et Dulong.
deutoxide d'azote	1,0388	1,0390	1,3490	Bérard.
hydrogène-bi-carburé		0,9816	1,2752	Thomson.
azote	0,9757		1,2675	Berzel. et Dulong.
oxide de carbone.	0,9569	0,9732	1,2451	Cruikshanks.
hydrogène per-phosphoré	0,9022			Thomson.
hydrogène proto-phosphoré.	0,8700			H. Davy.
ammoniacal	0,5967	0,5910	0,7752	Biot et Arago.
hydrogène proto-carboré		0,5396	0,7270	Thomson.
hydrogène.	0,0688		0,0894	Berzel. et Dulong.
Vapeur de perchlorure d'étain.	9,200	8,993	11,951	Dumas.
d'iode	8,716	8,612	11,523	id.
de perchlorure de titane	6,856	7,047	8,881	id.
de mercure	6,976	6,978	9,062	id.
de proto-chlorure d'arsenic.	6,501	6,297	8,185	id.
de chlorure de silicium	5,939	5,960	7,715	id.
d'éther hydriodique.	5,475	»	7,112	Gay-Lussac.
d'essence de térébenthine.	5,013	4,211	6,512	id.
de protochlorure de phosph.	4,875	4,808	6,353	Dumas.
de chlorure de bore.	3,942	4,079	5,121	id.
d'acide fluorique silicé	3,600	3,597	»	id.
d'hydro-bi-carb. de chlore.	3,443	3,408	4,473	
nitreuse	»	3,180	4,152	Colin et Robiquet.
d'hydrogène arseniqué.	2,695	2,695	3,502	Dumas.
de sulfure de carbone	2,645	»	3,436	Gay-Lussac.
d'éther sulfurique	2,586	2,583	3,395	id.
d'acide fluo-borique.	2,312	2,307	»	id.
d'éther hydro-chlorique	2,2190	2,2290	2,8827	Théoard.
d'acide chloro-cyanique.		2,1228	2,7577	Gay-Lussac.
d'alcool absolu	1,6133	1,6016	2,0958	id.
d'acide hydro-cyanique	0,9476	0,9442	1,2310	id.
d'eau	0,6255	0,6200	0,8100	id.
de carbone		0,4220	0,5482	

191. Les densités calculées se déduisent des combinaisons chimiques, par des considérations dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici.

192. Si l'on représente par ν la densité d'un gaz à la température 0, sous la pression de 760^{mm}, et par ν' la densité du même gaz à la température de t , sous la pression n , il est très facile de trouver la relation qui existe entre les deux densités, les deux pressions et les deux températures. En effet, prenant, par exemple, 1 centimètre cube du gaz dans les premières circonstances, ce centimètre cube deviendra $1 + \alpha t$, en passant à la température t (α étant le coefficient de dilatation 0,00375), et en passant de la pression 760 à la pression n , ce volume deviendra

$$\frac{(1 + \alpha t) 760}{n},$$

puisque les volumes sont en raison inverse des pressions. Or, le poids restant le même, les densités sont en raison inverse des volumes, donc

$$\nu : \nu' :: \frac{(1 + \alpha t) 760}{n} : 1;$$

d'où
$$\nu' = \frac{n}{760 (1 + \alpha t)}.$$

Un autre gaz dont la densité serait ν_1 , à la température 0, sous la pression de 760, et ν'_1 , à la température t , sous la pression n , donnerait pareillement

$$\nu'_1 = \frac{n}{760 (1 + \alpha t)};$$

d'où il résulte
$$\frac{\nu'}{\nu'_1} = \frac{\nu}{\nu_1};$$

c'est-à-dire que les densités des gaz conservent le même rapport à toute température et à toute pression. Ainsi, à la température rouge, comme la température 0, sous la pression de 100 atmosphères, comme sous la pression d'une seule atmosphère, la densité de l'hydrogène, par exemple, sera toujours 0,069 ou environ 1/15 de la densité de l'air, soumis aux mêmes circonstances. Cette vérité fondamentale est facile à comprendre directement, lorsqu'on se rappelle que la loi de Mariotte, pour la compression, et la loi de M. Gay-Lussac, pour la dilatation, sont deux lois communes à tous les gaz, quelle que soit leur nature.

193. Avec les données précédentes, on peut trouver, par un calcul très simple, la densité d'un mélange gazeux, formé dans des proportions connues en poids ou en volumes. Réciproquement, la densité d'un mélange étant connue, on en peut déduire la densité, le poids ou le volume de l'un de ses éléments, lorsque toutes les autres choses sont déjà déterminées.

194. Densité de l'eau distillée. — Tous les corps

changent de volume à chaque instant, par l'influence de la chaleur; ainsi à chaque instant ils changent de densité. Mais dans la loi de ces variations, l'eau présente une exception remarquable : à partir de 0, lorsqu'on élève sa température, elle se retire sur elle-même, au lieu de se dilater, et elle se retire de plus en plus, jusqu'à la température d'environ 4°; ensuite, en la chauffant davantage, elle commence à éprouver une expansion, comme font tous les autres corps, et, dès cet instant, sa dilatation est continuellement croissante jusqu'à l'ébullition. Vers la température de 4°, l'eau éprouve donc un *maximum de contraction*. Ce phénomène est frappant, lorsqu'on l'observe sur un thermomètre à eau, dont chaque degré occupe une assez grande étendue. Ce thermomètre descend comme le thermomètre à mercure, lorsqu'on les plonge ensemble dans un bain liquide, qu'est, par exemple, à 10°, et que l'en refroidit peu à peu; mais, aux approches du 4° degré, le refroidissement augmentant, et le thermomètre à mercure continuant de descendre, on voit le thermomètre à eau qui remonte, comme si on le chauffait, et qui remonte ainsi jusqu'à la température de la glace. En poussant le refroidissement plus loin, l'eau du thermomètre se gèle, et prend tout à coup un accroissement de volume très considérable; on peut donc présumer qu'à partir de 4° les molécules liquides commencent à s'écarter l'une de l'autre, et qu'elles se préparent en quelque sorte à prendre les positions respectives qu'elles doivent avoir pour passer à l'état solide. L'eau qui tient en dissolution quelques sels, ou d'autres substances étrangères, paraît présenter encore les propriétés du maximum de contraction et de l'accroissement de volume, par la congélation; mais, comme elle se gèle à une température plus basse que 0, c'est aussi à une température plus basse que 4° qu'elle éprouve son maximum de contraction. Ces phénomènes ne semblent d'abord que des exceptions fortuites et de peu d'importance; mais nous verrons plus tard qu'ils ont une grande influence sur la distribution de la chaleur dans l'étendue des mers et de tous les continents. C'est par là que dans les latitudes élevées, les rivières, les lacs et les mers peuvent rester liquides à une certaine profondeur; c'est par là que les êtres vivants qui peuplent les eaux peuvent se conserver dans toutes les saisons et se perpétuer; c'est par là enfin qu'il s'établit une circulation de chaleur entre les pôles et l'équateur, et une température moyenne qui est plus modérée dans tous les climats.

Le point précis du maximum de contraction, et les différentes densités de l'eau, à diverses températures, ont été l'objet d'un grand nombre de recherches. Entre tous les résultats qui ont été donnés par tant d'habiles observateurs, nous choisirons ceux de M. Hallström, qui se recommandent par la rigueur de la méthode, et par l'exactitude des expériences. Voici le tableau de ses résultats.

Densités et volumes de l'eau de 0 à 30° centigrades.

Température.	SE PRESENTANT POUR UNITÉ LA DENSITÉ ET LA VOLUME À 0.		SE PRESENTANT POUR UNITÉ LA DENSITÉ ET LA VOLUME À 4° C.	
	Pourcentages spécifiques.	Volumes.	Pourcentages spécifiques.	Volumes.
0°	1,0	1,0	0,9998918	1,0001069
1	0,9999466	0,9999536	0,9999382	1,0000617
2	0,9999799	0,9999202	0,9999717	1,0000181
3	0,9999104	0,9998896	0,9999920	1,0000078
4	0,9999104	0,9998896	0,9999920	1,0000002
5	0,9999104	0,9998896	1,0	1,0
6	0,9999104	0,9998896	0,9999950	1,0000050
7	0,9999104	0,9998896	0,9999773	1,0000228
8	0,9999104	0,9998896	0,9999477	1,0000527
9	0,9999104	0,9998896	0,9999044	1,0000954
10	0,9999104	0,9998896	0,9998497	1,0001501
11	0,9999104	0,9998896	0,9997825	1,0002200
12	0,9999104	0,9998896	0,9997030	1,0003070
13	0,9999104	0,9998896	0,9996117	1,0004088
14	0,9999104	0,9998896	0,9995080	1,0005284
15	0,9999104	0,9998896	0,9993932	1,0006681
16	0,9999104	0,9998896	0,9992647	1,0008287
17	0,9999104	0,9998896	0,9991280	1,0010129
18	0,9999104	0,9998896	0,9989825	1,0012268
19	0,9999104	0,9998896	0,9988287	1,0014651
20	0,9999104	0,9998896	0,9986656	1,0017300
21	0,9999104	0,9998896	0,9984939	1,0020254
22	0,9999104	0,9998896	0,9983130	1,0023549
23	0,9999104	0,9998896	0,9981237	1,0027196
24	0,9999104	0,9998896	0,9979260	1,0031208
25	0,9999104	0,9998896	0,9977207	1,0035593
26	0,9999104	0,9998896	0,9975070	1,0040361
27	0,9999104	0,9998896	0,9972859	1,0045522
28	0,9999104	0,9998896	0,9970574	1,0051084
29	0,9999104	0,9998896	0,9968214	1,0057054
30	0,9999104	0,9998896	0,9965777	1,0063437

M. Hallstrom trouve le maximum de contraction à 4°,108; mais en discutant toutes les probabilités des erreurs, il pense que, dans cette détermination difficile, on peut se tromper de 0°,338, en plus ou en moins. Nous adopterons donc 4°,1 comme étant le nombre qui est probablement le plus exact. Dans le premier tableau, on a pris pour unité la densité à 0, et le volume à 0; dans le second, on a pris pour unité la densité maximum et le volume minimum, c'est-à-dire à 4°,1. C'est par le principe d'Archimède (85) que M. Hallstrom est parvenu à ces résultats. Le corps plongé qu'il employait était une boule creuse de verre, lestée avec du sable, de manière à être très peu pesante dans l'eau; il la suspendait par un cheveu à une balance hydrostatique très sensible, et il cherchait les diverses pertes de poids qu'elle éprouvait dans l'eau, à toutes les températures comprises entre 0 et 30°. La dilatation du verre étant déterminée d'avance avec beaucoup de soin, il pouvait calculer pour chaque expérience le volume et le poids de l'eau déplacée, et par conséquent sa densité.

195. *Densité des liquides.* — Le principe d'Archimède, servant à comparer entre elles les densités de l'eau à diverses températures, peut servir pareillement à trouver les densités de tous les liquides. Si l'on veut, par exemple, connaître la densité de l'alcool par rapport à celle de l'eau, il suffira de prendre un corps solide plus dense que ces liquides, et d'en faire trois pesées successives : la première dans l'air, la seconde dans l'eau, et la troisième dans l'alcool. La perte de poids que ce corps fait dans l'eau est égale au poids de l'eau qu'il déplace (85), et la perte de poids qu'il fait dans l'alcool est pareillement égale au poids de l'alcool. Or, la température étant la même, les volumes des liquides déplacés sont aussi les mêmes, donc le rapport de leur poids est égal au rapport de leur densité. Quand les pesées sont faites à des températures différentes, on les réduit, par le calcul, à ce qu'elles seraient à la température 0; mais pour cela il faut connaître la loi de dilatation du corps plongé et celle de chaque liquide.

On peut déterminer aussi la densité des liquides par les *pesées directes* d'un même volume de tous ces corps. Pour y parvenir par ce second procédé, on prend un petit flacon de verre, ayant un bouchon à l'émeri, qui le ferme d'une manière très exacte; on le pèse seul, et on le pèse ensuite rempli d'un liquide : la différence des poids est le poids du liquide qu'il contient.

Par exemple : Le flacon seul pèse 100 gr.
Le flacon plein d'eau à 0 pèse 200 gr.

Le poids de l'eau contenue dans le flacon est 100 gr.
A la même température de 0

Le flacon seul pèse toujours 100
Le flacon plein d'alcool pèse 179

Le poids de l'alcool contenu dans le flacon est 79

Les volumes d'eau et d'alcool étant les mêmes, les densités de ces liquides sont entre elles comme les poids; donc la densité de l'alcool est 0,79.

Lorsque la température n'est pas 0, il faut corriger les résultats des effets que produit la dilatation, sur le verre du flacon et sur les liquides que l'on soumet à l'expérience.

196. Le tableau suivant contient les résultats les plus usuels.

Densité des liquides, en prenant pour unité la densité de l'eau à 0.

Acide sulfurique.	1,8400	Vin de Bourgogne.	0,9215
Acide nitrique.	1,5115	Huile d'olive.	0,8153
Eau de la mer.	1,2005	Eau maritime.	0,8740
Acide nitreux.	1,5316	Huile essentielle de té.	0,8697
Eau de la mer.	1,0263	Alcool absolu.	0,7920
Lait.	1,0300	Ether sulfurique.	0,7135
Eau distillée.	1,0000		
Vin de Bordeaux.	0,9930		

197. *Des Aréomètres.* — Les aréomètres sont des flotteurs qui donnent immédiatement les densités des liquides dans lesquels ils s'enfoncent.

On distingue deux sortes d'aréomètres, les aréo-

mètres à poids variable, et les aréomètres à volume variable.

La figure 186 représente un aréomètre à poids variable; v est le volume ou le corps de l'instrument; on le fait en verre ou en fer-blanc; t est la tige, c'est-à-dire une petite masse de mercure ou de plomb, que l'on ajuste à la partie inférieure; t est la tige, qui doit être très délicate; enfin e est le chapeau sur lequel on doit mettre des poids. Quand l'instrument est dans un liquide, il se dispose d'après les conditions d'équilibre des corps flottants (97); il se tient debout à cause du lest qui rebaisse son centre de gravité, et il s'enfonce jusqu'à ce qu'il y ait égalité entre son poids et le poids du liquide qu'il déplace; alors on ajoute des poids additionnels sur le chapeau, pour affleurer l'instrument, c'est-à-dire pour qu'un petit trait f , marqué sur la tige, se trouve exactement à fleur d'eau. Dans les différents liquides, il faut des poids différents pour produire l'affleurement, et c'est pour cela qu'on l'appelle un aréomètre à poids variable. Soit r le poids de l'instrument, soient p les poids additionnels qu'il faut y ajouter pour l'affleurer dans l'eau à 0, soient p' les poids additionnels qu'il faut y ajouter pour l'affleurer dans l'alcool à 0, la densité de l'alcool sera à la densité de l'eau, comme $r + p$ est à $r + p'$.

L'aréomètre est d'autant plus sensible, que le volume plongé est plus considérable, et que la tige est plus fine.

On conçoit que, pour éviter les calculs, il est possible de former, pour chaque instrument, une table particulière, où l'on trouve immédiatement la densité à côté du poids additionnel p' .

198. L'aréomètre à volume variable est représenté figure 188; il a en général moins de volume que l'aréomètre à poids variable; la tige est un petit tube de verre creux; le corps de l'instrument est une boule soufflée à l'extrémité du tube; et le lest se loge dans le petit appendice en verre qui est au-dessous de la boule; une bande de papier est soigneusement fixée dans l'intérieur de la tige, pour porter les divisions qui marquent les densités. Le poids de cet aréomètre étant constant, il en résulte que les densités des liquides dans lesquels il s'enfonce, sont entre elles en raison inverse des volumes plongés. C'est d'après ce principe que l'on fait la graduation, et l'on écrit sur la bande de papier qui sert d'échelle les nombres qui expriment directement les densités des liquides. Ainsi quand l'aréomètre s'enfonce que jusqu'à nombre 1200, la densité est 1200, s'il s'enfonce jusqu'au nombre 900, la densité est 900, etc.; la densité de l'eau est représentée par 1000.

199. Les pèse-liqueurs sont des espèces d'aréomètres, qui ne sont pas gradués pour donner les densités des liqueurs dans lesquelles on les plonge, mais seulement pour donner leur degré de concentration. Les acides sont étendus d'une quantité d'eau plus ou moins grande, les dissolutions so-

lides sont plus ou moins saturées, les eaux-de-vie et les esprits sont plus ou moins riches en alcool; et l'on a fait des pèse-acides, des pèse-sels et des pèse-esprits, pour reconnaître immédiatement les différents états dans lesquels ces liquides peuvent se présenter.

Pèse-acide ou aréomètre de Beaumé. — Cet aréomètre a toute l'apparence d'un aréomètre à volume variable; mais il en diffère essentiellement par sa graduation. Au point où il s'arrête dans l'eau pure, on marque 0; ou point où il s'arrête dans un mélange de 85 parties d'eau et de 15 de sel ordinaire, on marque 16, on divise l'intervalle en 16 parties, et l'on continue les divisions au-dessous. Deux dissolutions saturées à divers degrés marqueront évidemment des degrés différents sur l'aréomètre; la plus saturée marquera des degrés plus élevés, mais on n'en pourra rien conclure directement, ni sur les densités réelles de ces dissolutions, ni sur les proportions de sel qu'elles contiennent.

Les pèse-sels et les pèse-esprits sont gradués d'après des principes analogues; ils sont donc, comme le pèse-acide, des instruments de commerce, plutôt que des instruments de physique; car le degré aréométrique sert à régler le cours des marchandises, sans rien indiquer sur la juste proportion des éléments qui les constituent.

200. L'alcoomètre centésimal de M. Gay-Lussac est fondé sur de tout autres principes. Étant donné des esprits ou des eaux-de-vie, il suffit d'y plonger l'alcoomètre, pour connaître à l'instant leur force réelle, leur richesse en alcool et leur densité. Cet instrument, qui offre d'immenses avantages à la régie et au commerce, repose sur des recherches très précieuses pour la science; son utilité, déjà démontrée par l'usage, a été sanctionnée par une loi. Il est nécessaire, pour en prendre une juste idée, de consulter l'instruction pour l'usage de l'alcoomètre centésimal que M. Gay-Lussac a publiée en 1824.

201. Densité des corps solides. — On détermine les densités des solides, comme celles des liquides, par trois procédés différents, savoir : au moyen de l'aréomètre, du flacon bouché ou de la balance hydrostatique.

202. L'aréomètre que l'on emploie pour déterminer les densités des corps solides, est un aréomètre à volume constant, qui s'appelle aréomètre de Fohrenheit, aréomètre de Nicholson, ou aréomètre-balance de Charles, suivant quelques légères modifications dans la disposition des pièces. Les Fig. 186 et 187 représentent l'aréomètre de Charles. Entre le corps v de l'instrument et le lest t , se trouve un petit panier ou un petitseau d'argent, destiné à recevoir les fragments de matière dont on cherche la densité. Quand les corps sont plus pesants que l'eau, ils doivent exercer une pression de haut en bas; et le panier est accroché par l'anneau (Fig. 186), afin de recevoir cette pression; quand les corps sont spécifiquement plus légers que l'eau,

ils doivent exercer une pression du bas en haut, et alors on retourne le panier et on l'accroche par le fond (Fig. 187), afin qu'il reçoive encore cette pression.

Pour trouver une densité par ce moyen, il faut, avant tout, connaître le poids additionnel qui doit être mis sur le chapeau, pour affleurer l'instrument (187) dans l'eau distillée, c'est-à-dire pour le faire enfoncer jusqu'à un trait f que porte la tige. Supposons qu'à la température 0 le poids additionnel soit de 25 grammes, et avec cette donnée, cherchons la densité d'un corps quelconque, d'un diamant, par exemple. On met le diamant seul sur le chapeau, et on ajoute successivement des poids, jusqu'à produire l'affleurement : soit $23^{\text{re}}, 8$, ce qu'il faut ajouter; ces poids et le diamant équivalent ensemble à 25^{re} , puisque l'affleurement a lieu. Donc le diamant pèse $25^{\text{re}} - 23,8$ ou $1^{\text{re}}, 2$; tel est son poids dans l'air. Alors on met le diamant dans le panier d'argent, et aux $23^{\text{re}}, 8$ qui sont restés sur le chapeau on ajoute ce qui est nécessaire pour l'affleurement; $0^{\text{re}}, 34$ suffisent pour cet effet, donc $0^{\text{re}}, 34$ représentent le poids que le diamant perd dans l'eau, et par conséquent le poids d'eau qu'il déplace (95) ou le poids d'un volume d'eau qui est égal au sien. Or, à volume égal, les densités sont entre elles comme les poids (45); donc la densité du diamant est $1,2/0,34$ ou 3,53.

Pour les corps plus légers que l'eau, le procédé est le même; avec cette seule différence, qu'il faut retourner le panier et l'accrocher par le fond; il n'y a rien à changer ni dans les raisonnements ni dans les calculs. Lorsque la température n'est pas 0, on fait les corrections.

203. Le flacon bouché qui sert à la recherche des densités, peut contenir environ 2 ou 3 décilitres d'eau. L'exactitude de l'expérience dépend en grande partie de la précision avec laquelle le bouchon est travaillé : il faut qu'il soit légèrement conique, bien usé à l'émeri, et parfaitement circulaire dans tout son contour, afin qu'il s'enfonce exactement de la même quantité dans toutes ses positions. Alors on procède de la manière suivante : on fait trois pesées; la première pour avoir le poids du corps solide dont on cherche la densité, la seconde pour avoir le poids v_1 , + s du flacon plein d'eau et du corps solide mis à côté de lui dans le même bassin, la troisième pour avoir le poids v_2 , du flacon et du corps solide mis dans son intérieur, et par conséquent ayant ébassé un volume d'eau égal au sien. La troisième pesée retranchée de la deuxième, c'est-à-dire v_2 , + $s - v_1$, donne le poids du volume d'eau chassé; et puisqu'à volume égal les densités sont comme les poids (45), la densité du corps est $\frac{s}{v_2 + s - v_1}$. Quand la température n'est pas 0, il faut faire les corrections : ce procédé ne peut s'appliquer qu'à de petites masses; il importe peu qu'elles soient spécifiquement plus pesantes ou plus légères que l'eau.

Les corps qui sont solubles dans l'eau se pèsent dans l'alcool, dans le mercure ou dans un autre liquide de densité connue.

Les corps poreux et susceptibles de s'imbiher ont des densités variables suivant le degré d'imbibition. Il est difficile de les déterminer avec exactitude.

204. La balance hydrostatique qui nous a servi (95) à démontrer le principe d'Archimède peut nous servir aussi à trouver les densités des corps solides. Pour l'employer à cet usage, elle n'a besoin d'aucune modification. Le procédé se réduit à faire deux pesées; par la première on trouve le poids s du corps, par la seconde on trouve la perte de poids x qu'il éprouve dans l'eau; cette perte de poids est le poids du volume d'eau déplacé (95):

donc la densité est $\frac{s}{x}$. Si la température n'est pas 0, on fait les corrections.

205. Nous avons rassemblé dans le tableau suivant les densités les plus authentiques et auxquelles on est obligé de recourir le plus souvent; elles ont été déterminées par l'un ou l'autre des trois procédés dont nous venons de parler.

Table de la densité des corps solides à 0 de température, en prenant pour unité la densité de l'eau.

Aerol.	33,0000	Saphir du Brésil.	3,9941
(diamant).	33,6690	Topaze de Basse.	3,5550
Pistone, pesée à la filière 21,0417		Béryl oriental.	3,5469
(saphir).	30,5376	Diamants les plus légers	
(poids).	19,5000	(légèrement colorés	
Or.	19,3617	en rose).	6,5310
(soudé).	19,3381	— les plus légers.	3,8110
Iridium.	18,600	Pliat-glass (anglais).	3,3293
Tungstène.	17,6000	Spath fluor (rouge).	3,2911
Mercuré à 0°.	13,5980	Tourmaline (verte).	3,1558
Ptomb fondu.	11,3513	Asbeste rouge.	3,9058
Palladium.	11,3000	Marbre de Paros (chaud	
Rhodium.	11,0000	carbureux insoluble) 2 8376	
Argent fondu.	10,4763	Quartz jaune-rouge.	3,8180
Bismuth fondu.	9,8220	Emeraude verte.	3,7735
Cuivre en fil.	8,9355	Perles.	2,7500
Cadmium.	8,694	Chaux autrichienne crüe	
Molybdène.	8,6110	tallée.	2,7181
Lithum.	8,595	Quartz jaune.	2,7101
Arsenic.	8,3000	Corail.	2,6800
Nickel fondu.	8,2790	Créteil de roche pure.	2,6550
Uran.	6,1000	Quartz agate.	2,6160
Acier non écroui.	7,8183	Feld-spath limpide.	2,5760
Cobalt fondu.	7,8119	Verre de Saint-Gobain. 2 5682	
Fer en barre.	7,7880	Porcelaine de la Chine. 2 3847	
Étain fondu.	7,2914	Chaux malaisée cristall.	
Fei fondu.	7,2070	etc.	3,3117
Zinc fondu.	6,8610	Porcelaine du Sèvres.	2,1457
Manganèse.	6,85	Soufre naïf.	2,0332
Antimoine fondu.	6,7120	Isivre.	1,9170
Tellure.	6,1150	Albâtre.	1,4740
Chrom.	5,9000	Anthracite.	1,8000
Iode.	4,9480	Phosphore.	1,770
Spath pesant.	4,4500	Alun.	1,7100
Jargon de Ceylan.	4,4161	Boutille compacte.	1,3292
Sélénium.	4,320	Jayet.	1,1580
Rubis oriental.	4,2833	Succin.	1,078
Saphir oriental.	4,2833	Soudure.	0,9726
Topaze orientale.	4,0106	Potassium.	0,8661

Bois de hêtre.	0,8370	Tilleul	0,6060
Frêne.	0,7550	Bois de Cypres.	0,5980
IL.	0,8070	Bois de cèdre.	0,5619
Bois d'orme.	0,5000	Peuplier blanc d'Espa-	
Pommier.	0,7550	gne.	0,5290
Bois d'orange.	0,7054	Bois de saunders.	0,5470
Sapin jaune.	0,6370	Peuplier ordinaire.	0,5650
Glace.	0,9300	Liège.	0,7400

206. *Observations.* — On voit, par l'exemple du platine et de l'or, qu'une même substance, au même état de pureté et à la même température, peut avoir des densités très sensiblement différentes. La pression subite du balancier fait dans le métal des monnaies et des médailles le même effet que les coups répétés du marteau sur le platine, l'or et le fer; par ces effets mécaniques, les molécules se rapprochent, le métal s'écroute, et sa densité augmente. Il paraît résulter de quelques expériences de M. Perkins que, sous des pressions de mille ou deux mille atmosphères, plusieurs corps solides, après s'être comprimés peu à peu, se réduisent en poudre impalpable, comme si leurs molécules, rapprochées à un certain degré, n'avaient plus assez de force répulsive pour se maintenir à la distance qui constitue l'état solide. Ainsi on peut conclure, par analogie, qu'il y a pour chaque substance une limite de densité qu'il est impossible de dépasser, quelque effort

que l'on fasse pour porter les molécules à un plus grand degré de rapprochement.

On sait que la plupart des substances minéralogiques peuvent se présenter sous des aspects très différents. La chaux carbonatée, par exemple, peut être à l'état de cristal régulier et transparent comme le verre, elle peut être à l'état de calcaire grossier, et, entre ces deux extrêmes, elle peut prendre des états d'agréation très variés, dont on peut juger par les nuances qui distinguent les marbres de différentes espèces. Or dans tous ces états la densité de la chaux carbonatée est loin d'être la même; et ce qui est digne de remarque, c'est que l'état cristallin le plus transparent et le plus parfait paraît être aussi celui qui donne la plus grande densité.

Les substances végétales ont des densités très variables, suivant leur âge, suivant le climat où elles naissent, et suivant la nature du sol qui les produit. Dans un même individu, les différentes couches, quoique composées sensiblement de la même manière, ont des densités différentes; les couches du centre sont toujours plus légères que les couches extérieures, soit à cause des nombreux vaisseaux qui s'y trouvent, soit à cause d'une texture particulière des fibres.

CHAPITRE VII.

DES ÉCHILLES THERMOMÉTRIQUES. — DES THERMOMÈTRES DE DIFFÉRENTES ESPÈCES ET DES PYROMÈTRES.

207. Le thermomètre peut remplir des objets très différents : premièrement, il peut servir à déterminer les températures auxquelles se manifestent les divers phénomènes dépendans de la chaleur; secondement, il peut servir à évaluer numériquement ces températures, à les comparer entre elles comme on compare toutes les grandeurs, et à déduire de ces rapports les lois générales de la cause elle-même qui produit les phénomènes. Si l'on ne voulait atteindre que le premier objet, toute substance serait bonne pour la construction du thermomètre et toute division serait bonne pour sa graduation : il suffirait de s'entendre; il suffirait que les observateurs de tous les pays voulussent bien choisir la même substance et adopter la même graduation. On pourrait même se dispenser d'employer des nombres pour marquer les degrés, car les nombres représenteraient alors des signes et non pas des grandeurs, et il serait tout aussi commode d'employer d'autres signes convenus, tels, par exemples, que les lettres de l'alphabet ou les notes de la musique, ou quelque autre signe bizarre imaginé

à plaisir. Le sommet de la colonne thermométrique parcourait les divers signes marqués sur la tige du thermomètre comme le soleil parcourt les signes du zodiaque; et pour caractériser un phénomène il suffirait de marquer le point où la colonne se trouve, à l'instant où ce phénomène se produit. Mais lorsqu'on veut atteindre le second objet, lorsqu'on veut comparer les températures pour saisir les lois de leurs périodes ou de leurs accroissemens, il faut de toute nécessité que les températures soient exprimées par des grandeurs ou par des nombres; car nous ne pouvons comparer exactement que des grandeurs ou des nombres. Or, en adoptant le mode de graduation dont nous avons parlé (183), il est évident que le nombre qui exprime une température dépend du choix de la substance dont se compose le thermomètre; ainsi nous avons vu (163) que, le thermomètre à mercure marquant 200°, le thermomètre à air marquant 197°, &c. Et comme nous avons démontré (179) que toutes les substances solides ou liquides se dilatent irrégulièrement par rapport au thermomètre à

air, et irrégulièrement entre elles, il en résulte que là où le thermomètre à air marquerait, par exemple, 300°, chaque substance marquerait un nombre différent : le thermomètre de verre marquerait 353, celui de fer 373, celui du cuivre 320, et celui de platine 312. Le tableau suivant renferme des comparaisons qui ont été faites par Deluc sur des thermomètres construits avec des liquides différents; elles ne s'étendent pas au-dessus de 100°, mais dans ces limites les différences sont cependant si considérables qu'elles feraient mieux sentir encore combien les valeurs numériques des températures dépendent du choix des substances.

Marche comparative des thermomètres construits avec différents liquides.

Mercury.	Water.	Alcohol.	Alcohol.	Alcohol.	Alcohol.	Alcohol.	Alcohol.	Alcohol.	Alcohol.
100°	100°	100°	100°	100°	100°	100°	100°	100°	100°
75	74,6	74,7	74,3	74,1	73,8	73,7	71,6	71,0	71,0
70	69,4	69,5	68,8	68,4	67,8	66,1	62,9	62,0	62,0
65	64,1	64,3	63,5	62,6	61,9	60,6	57,2	55,5	55,5
60	58,3	58,4	58,3	57,1	56,2	54,6	47,7	45,8	45,8
55	54,2	53,9	53,3	52,7	50,7	49,1	40,6	38,5	38,5
50	49,7	48,8	48,3	46,6	45,5	43,6	34,4	32,0	32,0
45	44,0	43,8	43,4	41,2	40,3	38,4	28,4	26,1	26,1
40	39,3	38,6	38,4	36,3	35,1	33,3	23,0	20,5	20,5
35	34,2	33,6	33,5	31,3	30,2	28,4	18,0	15,9	15,9
30	29,3	28,7	28,6	26,5	25,6	23,9	13,5	11,2	11,2
25	24,3	23,8	23,8	21,9	21,0	19,4	9,4	7,1	7,1
20	19,3	18,9	19,0	17,3	16,5	15,3	6,1	4,1	4,1
15	14,4	14,1	14,2	12,8	12,3	11,1	3,4	1,6	1,6
10	9,8	9,3	9,4	8,4	7,9	7,1	1,5	0,3	0,3
5	4,7	4,6	4,7	4,2	3,9	3,4	0,1	-0,4	-0,4
— 0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
— 5				-0,1	-3,9				
— 10				-0,2	-7,1				

La première colonne indique les degrés du thermomètre à mercure, d'après la division de Réaumur; l'intervalle entre la glace fondante et l'eau bouillante étant divisé en 80 parties seulement.

Les colonnes suivantes indiquent les degrés que marquent les autres thermomètres gradués de la même manière. Par exemple, le thermomètre à mercure marquant 20°, les autres marquent 19,3; 18,9; 19,0; 17,3; 16,5; 15,3; 9,1; 4,1. On peut juger par là de la discordance qui existe entre les instruments composés de substances différentes.

Il est donc bien démontré que, pour découvrir des rapports simples entre les diverses températures auxquelles se produisent les phénomènes de même nature ou les diverses périodes d'un phénomène, il importe de construire le thermomètre avec telle substance plutôt qu'avec telle autre substance.

208. *Thermomètre d'air.* — Les belles découvertes de MM. Dulong et Petit, dont nous parlerons un peu plus loin, ne laissent aucune incertitude sur l'espèce de substance que l'on doit choisir préférablement à toute autre; elles démontrent que le thermomètre à air ou à gaz conduit à des lois générales très remarquables, et qu'il serait impossible d'arriver à ces lois, ou même de les exprimer en mesurant les températures avec des thermomètres d'une autre espèce.

209. *Thermomètre à mercure.* — Cependant les diverses dispositions que l'on peut donner au thermomètre à air n'étant pas d'un usage commode, on emploie de préférence le thermomètre à mercure; on peut l'employer en toute sûreté depuis — 36° jusqu'à 100°, puisque dans ces limites il marche parfaitement d'accord avec le thermomètre à air (163); mais lorsque les températures sont plus hautes que 100° ou plus basses que — 36°, il faut faire un calcul pour ramener les indications du thermomètre à mercure au nombre que donnerait le thermomètre à air auquel il faut toujours revenir comme à un type fondamental.

210. *Thermomètre d'esprit de vin.* — Les thermomètres à esprit de vin, dont on fait un grand usage dans les observations météorologiques, ont l'avantage de descendre à des températures plus basses que les thermomètres à mercure, car il n'y a point de froid assez vif pour geler l'alcool rectifié; et en outre ils ont l'avantage, dans ces degrés inférieurs, de s'accorder assez bien avec le thermomètre à air. Cependant pour des recherches exactes il ne faudrait employer le thermomètre à alcool au-dessous de 0 qu'après s'être assuré de sa marche, comme MM. Dulong et Petit se sont assurés de la marche du thermomètre à mercure; et au-dessus de 0 le thermomètre à esprit de vin est sensiblement en défaut, comme en en peut juger par la table précédente (207). Aussi toutes les fois que l'on donne des températures déterminées par ce thermomètre, il est nécessaire d'en prévenir.

211. Les thermomètres que l'on pourrait construire avec d'autres substances liquides donneraient des évaluations numériques de température qui ne pourraient servir de base à aucun calcul, à moins que l'on n'ait déterminé d'avance leur marche comparative pour substituer aux degrés qu'ils marquent les degrés que marquerait le thermomètre à air.

212. *Échelles thermométriques.* — Nous avons déjà dit (163) que les points fixes, généralement adoptés pour la graduation des thermomètres, sont celui de la glace fondante et celui de l'eau bouillante; mais l'intervalle compris entre ces points n'est pas toujours divisé de la même manière. Il y a trois modes de division qui donnent trois échelles thermométriques différentes, en si l'on veut, trois espèces de thermomètre : le thermomètre centigrade et le thermomètre de Réaumur, qui sont en usage

en France, et le *thermomètre de Fahrenheit*, qui est en usage en Angleterre.

Pour le thermomètre centigrade on marque 0 à la glace et 100° à l'ébull. de Réaumur. 0. 80
de Fahrenheit. 32. 212

Avec ces données il est facile de convertir les degrés de Réaumur et de Fahrenheit en degrés centigrades.

Puisque 80 R valent 100° c.
1° R vaut $\frac{5}{4}$ c.

Donc il suffit de multiplier par $\frac{5}{4}$ les degrés de Réaumur pour en faire des degrés centigrades; et réciproquement en multipliant par $\frac{4}{5}$ les degrés centigrades on en fera des degrés de Réaumur.

Puisque 180 F valent 100° c.
1° F vaut $\frac{5}{9}$ c.

Donc, une température en degrés de Fahrenheit étant donnée, il faut en retrancher 32, et multiplier le résultat par $\frac{5}{9}$ pour en faire des degrés centigrades.

213. *Thermomètre à maximum de M. Gay-Lussac.* — On appelle en général thermomètres à maximum, ceux qui peuvent conserver la marque des plus hautes et des plus basses températures qu'ils ont éprouvées pendant une période de temps quelconque. Ainsi un instrument de cette espèce étant abandonné à lui-même et exposé à l'action des causes extérieures pendant un jour, on même pendant un mois ou une année, on pourra savoir, en l'observant après ce laps de temps, quel est le point le plus haut où il s'est élevé et le point le plus bas où il est descendu. Le thermomètre à maximum de M. Gay-Lussac est représenté figure 176; il se compose d'un ballon b, dont le col a été fermé à la lampe, et ensuite percé en son sommet d'une petite ouverture s extrêmement capillaire, et dont les parois doivent être très minces. Autour du col du ballon, et à sa partie inférieure, on mastique un large tube tt; le ballon et le tube étant remplis d'eau ou d'alcool à une température donnée, en verse du mercure qui gagne le fond du tube et qui s'élève jusqu'à un niveau m, mais qui ne pénètre pas dans le ballon à cause de la petitesse de l'ouverture s. Cela posé, si la température s'abaisse, il se fait un vide dans le ballon, la pression extérieure y pousse du mercure pour le remplir, et quand tout l'effet est produit, on renverse l'appareil avec précaution, on fait sortir le mercure en chauffant un peu la boule, et on le jauge en le versant dans un tube qui est gradué pour cet usage. Le nombre des divisions que le mercure occupe dans ce tube à une température donnée, indique, au moyen d'une table dressée d'avance, quelle variation de température a dû supporter la boule.

Si la température s'élève au lieu de s'abaisser, le liquide sort du ballon, et le mercure n'y entre

pas; mais alors on ramène l'appareil à sa température primitive, et par la quantité de mercure qui pénètre dans la boule pendant ce refroidissement, on juge du degré de chaleur auquel elle a dû être portée.

214. *Thermomètre à maximum de Rutherford.* — Il se compose de deux thermomètres, recourbés et ajustés sur la même monture (Fig. 190); le liquide du premier bnt est du mercure, le liquide du second bat est de l'alcool coloré en rouge avec de l'orseille. Les tiges mt et at doivent être horizontales quand l'instrument est en expérience; pour cela la monture tourne au moyen d'une charnière e autour de son pied, dont on n'a représenté qu'une partie.

Dans l'intérieur du thermomètre à mercure est un petit cylindre f en fer ou en acier qui sert d'index et qui peut couler dans la partie vide du tube sans éprouver trop de frottement. Quand la température s'élève, l'index est poussé par la colonne de mercure, et quand elle s'abaisse, l'index reste en place, car le mercure ne saurait l'entraîner dans sa retraite; ainsi la position de l'index de fer marque la plus haute température à laquelle l'instrument soit arrivé, c'est-à-dire le maximum qu'il ait pu atteindre.

Dans l'intérieur du thermomètre à alcool est un petit cylindre d'émail servant aussi d'index et coulant librement sans toucher les parois et sans faire piston; le liquide passe sans le pousser. Supposons, par exemple, que l'index d'émail soit au sommet de la colonne d'alcool et dans son intérieur, il est visible que, si la température s'abaisse, l'index est pressé par le sommet de la colonne liquide, et se trouve forcé de le suivre dans tout son mouvement rétrograde; mais à l'instant où la température redevient croissante, le liquide passe autour de l'index sans le pousser, le sommet de la colonne s'éloigne; et l'index reste en place pour marquer la plus basse température à laquelle l'instrument soit arrivé, c'est-à-dire le minimum. Ainsi le thermomètre à mercure indique les maximum; et le thermomètre à alcool les minimum. Chacun d'eux a son échelle, graduée comme à l'ordinaire. Pour mettre l'instrument en expérience on le relève d'abord verticalement, et l'on donne quelques légères secousses pour faire tomber les index: celui de fer vient reposer sur le sommet de la colonne de mercure, et celui d'émail sur le sommet de la colonne d'alcool; le premier reste toujours au dehors du liquide, le second, toujours au dedans: cela fait, on lui donne la position horizontale, qui est la seule dans laquelle il puisse donner des indications sûres.

215. *Thermomètre à maximum de Bellani.* — Il se compose d'un réservoir d'alcool, d'une colonne recourbée de mercure, et de deux cylindres de fer enveloppés de verre, qui servent d'index (Fig. 179 et 180); l'alcool remplit tout le réservoir a et une partie du tube jusqu'en m; la colonne de mercure descend jusqu'à la courbure inférieure i, et se relève jusqu'en m'; au-dessus de m' se trouve une

autre colonne d'alcool, qui remplit en partie le petit réservoir *r*; un des index est représenté de grandeur naturelle dans la figure 180; la petite enveloppe du cylindre de fer est aplatie à l'extrémité *p*, par laquelle elle repose sur le mercure, et un cheveu se forme une boucle élastique, qui presse les parois du tube, et qui est capable de retenu l'index, quand il est simplement flottant dans la colonne d'alcool; mais quand l'index est poussé par le mercure, l'élasticité du cheveu ne l'empêche pas de marcher, et c'est ainsi qu'il marche ou qu'il reste en repos, suivant que le mercure le pousse ou l'abandonne. Lorsqu'on veut mettre l'appareil en expérience, on fait descendre les index sur le mercure, au moyen d'un aimant. On voit dans la figure 179 que l'index *b* est destiné à marquer les plus basses températures ou les minimum, et l'index *a* les hautes températures ou les maximum.

218. *Thermomètre à maximum de Six*. — C'est à Six que nous devons la première invention du thermomètre précédent; Bellani lui a seulement fait subir quelques changements, et il l'a réduit à deux branches, au lieu de trois, en agrandissant le réservoir *a*; il a enveloppé les cylindres de fer, et il a mis le cheveu en boucle, au lieu de le mettre droit, comme faisait Six.

217. *Thermomètres métalliques*. — On a essayé une foule de combinaisons et de dispositions différentes, pour employer les divers métaux à la construction des thermomètres; mais de tous les thermomètres métalliques qui reposent sur la dilatation d'un seul métal, l'usage n'en a conservé aucun qui mérite une description particulière. Il n'en est pas de même des thermomètres qui reposent sur l'inégale dilatation de deux ou de plusieurs métaux; ils peuvent offrir de grands avantages, soit dans les observations ordinaires, soit dans des recherches délicates, et nous pensons qu'il est nécessaire de faire connaître au moins les deux suivants.

218. *Thermomètres à cadran*. — La figure 206 représente une des dispositions que l'on donne habituellement aux thermomètres de cette espèce. *fg* est une lame à peu près semblable aux lames de compensation (183); elle se compose d'une petite bande de cuivre et d'une petite bande d'acier, clouées ou soudées ensemble dans toute leur longueur. Cette lame binaire est fixée en *f*; elle se recourbe en *g*, et elle se termine en *h*. Autour de l'axe *b* tourne un levier, dont le petit bras est sans cesse appuyé contre l'extrémité *h*, et dont le grand bras porte des dents *dd'*. Les mouvements très-petits que la dilatation peut produire à l'extrémité *h* sont déjà amplifiés dans le même rapport que les bras de levier; ensuite les dents *dd'* engrenent dans un petit pignon, qui tourne autour de l'axe central *c*, et l'aiguille *A*, tournant autour du même axe, amplifie encore les mouvements du pignon. On calcule les dimensions pour que les 100° du thermomètre centigrade correspondent à peu près à une révolution entière de l'aiguille. Les instru-

ments de cette espèce doivent être gradués sur le thermomètre à mercure, de degré en degré, ou au moins de 10° en 10°.

219. *Thermomètre de Bréguet*. — Cet instrument est le plus délicat et le plus commode de tous les thermomètres métalliques; il se compose d'un petit ruban de métal, de 1 à 2 millimètres de largeur, qui est roulé en spire, comme le représente la figure 177; la spire est attachée par son sommet à une pièce de cuivre, qui la laisse parfaitement libre et isolée, et, à son extrémité inférieure, elle porte une aiguille horizontale très légère, dont la pointe parcourt la circonférence du cercle divisé *ee'*; le cercle est évidé, et repose sur trois pieds très minces, afin que l'air puisse circuler aisément entre tous les tours de la spire. Une cloche recouvre l'appareil, pour le garantir de l'agitation extérieure.

Le ruban de la spire est composé de trois couches métalliques superposées, argent, or et platine; le couche d'or, qui est au milieu, sert à souder les deux autres; ce système a d'abord une épaisseur sensible; mais on le lamine jusqu'à le réduire à une épaisseur totale de 1/50 de millimètre; on peut juger par là de la masse excessivement petite de l'instrument, et par conséquent de la rapidité avec laquelle il prend la température de l'air qui le touche.

Par l'inégale dilatation du platine et de l'argent, la spire se tord ou se détord, quand la température s'élève ou s'abaisse, et l'aiguille marche pour obéir à ces mouvements. On gradue cet instrument en comparant sa marche à celle d'un thermomètre à mercure très sensible.

220. *Pyromètres métalliques*. — On nomme pyromètres les instruments qui sont destinés à mesurer les hautes températures, et en général on appelle hautes températures celles qui sont supérieures au point d'ébullition du mercure. On a fait des essais sans nombre pour construire des pyromètres avec les métaux; mais tous ces instruments ont deux grands inconvénients: d'abord ils ne reviennent pas exactement au même point pour le même degré de chaleur, parce que les pièces se tourmentent au feu, et ensuite il n'y a aucun rapport certain entre leurs indications et les indications du thermomètre centigrade.

Cependant ils peuvent être utiles dans les applications des arts, où l'on ne cherche pas à obtenir des évaluations numériques de températures, mais seulement à produire des degrés de chaleur déterminés, tantôt plus forts ou plus faibles, suivant les effets que l'on veut obtenir. Le pyromètre qui paraît le plus commode pour cet usage est représenté figure 178; il se compose d'une plaque ou d'un tourteau d'argile, sillonné dans sa longueur par une rainure un peu profonde, et d'une règle de fer ou de platine, placée de champ dans la rainure; la règle s'appuie d'une part contre un talon fixe, et de l'autre elle presse le petit bras d'un levier courbé dont le grand bras fait l'office d'aiguille et parcourt

un arc divisé. Le talon fixe et l'axe de rotation du levier étant portés l'un et l'autre par le tourteau d'argile, qui se dilate moins que le métal, en voit que l'aiguille doit prendre diverses positions, suivant les divers degrés de chaleur; mais lorsqu'on essaie d'évaluer les résultats en degrés centigrades, les nombres que l'on donne sont tout-à-fait illusoire, et n'ont sous doute aucun rapport avec la vérité.

221. *Pyromètre de Wedgewood.* — Cet instrument repose sur une propriété chimique très remarquable, dont jouissent à divers degrés les argiles de différentes espèces. L'argile ayant été pulvérisée, malaxée et séchée dans une étuve, à la température de 100°, si on l'expose ensuite à de hautes températures, on observe qu'elle se retire sur elle-même, et diminue de volume à mesure que la température s'élève. Cette *retraite*, ou, comme on dit aujourd'hui, ce *retrait* n'est pas une propriété passagère; l'argile qui l'a éprouvée n'est plus susceptible de revenir à son état ni à ses dimensions primitives, et plus la température s'élève, plus le retrait est considérable. Supposons donc que l'on ait un grand nombre de petits cylindres, qui soient tous de la même espèce d'argile, tous préparés de la même manière, et tous exactement de la même grandeur et de la même forme; il est évident que, si l'on en prend plusieurs, qu'on les expose chacun à une température particulière, il suffira de les mesurer ensuite pour connaître celles de ces températures qui sont les plus hautes et celles qui sont

les plus basses; car les températures seront d'autant plus hautes que le retrait sera plus considérable. C'est sur ce principe qu'est fondé le pyromètre de Wedgewood. Pour mesurer commodément les cylindres d'argile qui ont éprouvé le retrait, on les fait passer dans une rainure formée par deux règles de cuivre ou de laiton, légèrement inclinées l'une à l'autre (Fig. 181). Les deux règles et la plaque sur laquelle elles sont fixées s'appellent la *fauge*; on leur donne 609^{mm} de longueur, et l'on a coutume de les couper en deux parties repliées l'une sur l'autre, pour rendre l'appareil plus portatif. Sur la longueur totale on fait 240 divisions, que l'on appelle *degrés du thermomètre de Wedgewood*. Au sortir de l'étuve à 100°, chaque petit cylindre est juste de grandeur pour se tenir à l'entrée de la rainure.

Les figures 182 et 183 représentent la coupe et le plan d'un petit étui d'argile dans lequel on fait ordinairement chauffer les petits cylindres.

Pour graduer l'instrument et comparer ses indications à celles du thermomètre centigrade, il faudrait d'avance connaître la température qui est nécessaire pour réduire les petits cylindres au point de les faire aboutir aux divisions successives. Mais jusqu'à présent on ne connaît aucun moyen d'arriver à ces résultats. C'est par des hypothèses tout-à-fait gratuites que l'on établit ces rapports, et lorsqu'on dit que le du pyromètre de Wedgewood vaut 72° centigrades, on exprime une convention plutôt qu'une vérité.

DEUXIÈME PARTIE.

CHANGEMENS D'ÉTAT DES CORPS.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA FUSION ET DE LA SOLIDIFICATION.

222. *Fusion.* — Il est facile de reconnaître que la *fusion* ou le passage de l'état solide à l'état liquide est un phénomène produit par la chaleur, et qu'aucune autre cause dans la nature ne peut déterminer les corps à ce changement d'état : la glace peut être brisée ou réduite en poussière, elle peut être soumise à toutes les puissances mécaniques et à tous les agents naturels, sans cesser d'être un corps solide, à moins que la chaleur ne vienne exercer sur elle son action pour le convertir en eau. Il en est de même de la cire, et lorsqu'on la voit fondre aux rayons du soleil, on sait bien que c'est par l'effet de la chaleur qu'elle entre en fusion, et non par l'effet de la lumière; et si le plomb peut se liquéfier et devenir coulant, lorsqu'on le bat sur une enclume à coups redoublés, c'est que la compression et la percussion dégagent de la chaleur tout-à-fait semblable à la chaleur d'un foyer. Ainsi, l'état de solidité ou de fluidité d'un corps est un état relatif, dépendant uniquement de la température à laquelle ce corps est soumis. A une autre distance du soleil, la terre prendrait une autre consistance et un autre aspect : si elle en était plus voisine, les métaux seraient pour la plupart dans ce état habituel de fusion, et les profondeurs de la mer, au lieu d'être remplies d'eau, pourraient bien être remplies de substances métalliques liquéfiées; au contraire, si elle en était plus éloignée, la mer serait une masse solide, il n'y aurait plus d'eau coulante et probablement plus de liquide en circulation pour produire les phénomènes organiques de la végétation et de la vie.

La chaleur pénétrant et dilatant tous les corps, il est curieux de chercher si elle peut pareillement les faire passer tous sans exception de l'état solide à l'état liquide. Or, en examinant sous ce point de vue tous les corps solides, on trouve entre eux de grandes différences : il y en a qui sont très *fusibles* et qui ne peuvent soutenir des températures même très basses sans passer à l'état liquide; tels sont la glace, le phosphore, le soufre, la cire, les corps gras et les résines; il y en a d'autres qui exigent, pour se fondre, des températures un peu plus élevées, comme l'étain, le plomb et divers alliages; enfin il y en a qui ne peuvent entrer en fusion que par des feux long-temps soutenus et aux plus hautes températures que nous soyons capables de produire; l'or, l'acier, le fer et le platine sont dans ce cas. Les corps qui résistent à ces plus hauts degrés de

chaleur sont appelés *infusibles*, *fixes* ou *réfractaires*; et comme nos moyens de développer de la chaleur se perfectionnent de jour en jour, le nombre des substances infusibles a été sans cesse en diminuant. Le charbon paraît être le plus réfractaire de tous les corps : cependant plusieurs physiciens prétendent avoir observé quelques traces de fusion sur les arêtes des diamans qu'ils soumettaient à l'essai. En attendant que ce résultat soit constaté, on peut du moins conclure par analogie qu'il n'y a pas de corps essentiellement infusibles.

Les substances organiques, étant en général composées de carbone et d'éléments gazeux plus ou moins volatils, se décomposent souvent par l'action du feu plutôt que de se liquéfier. Le bois, fortement chauffé, se carbonise et ne se fond pas; il en est de même des fruits, des fleurs et des autres tissus végétaux; il en est de même encore des fibres musculaires et de tous les autres tissus des corps vivans. Toutes ces substances organiques se décomposent par la chaleur; les produits volatils s'exhalent, et il ne reste en dernier résultat que le charbon et les autres éléments fixes qui leur servent de bases.

Plusieurs corps inorganiques se décomposent aussi avant de se fondre, et il a fallu l'esprit inventif de Hall pour démontrer leur fusibilité. Son procédé consiste à chauffer ces corps en les maintenant sous une haute pression, de telle sorte que les éléments les plus volatils ne puissent pas s'exhaler. C'est ainsi que Hall a fait fondre du marbre, sans qu'il se convertît en chaux, et qu'il a démontré pareillement la fusibilité d'un grand nombre de substances volcaniques. Ces résultats sont importants pour discuter l'origine et la formation des diverses couches dont se compose la terre.

223. *Conditions de la fusion.* — Lorsque les corps passent de l'état solide à l'état liquide, ils présentent deux phénomènes singuliers (144 et 146); premièrement, ils restent solides jusqu'à ce qu'ils soient arrivés à une certaine température fixe, qui est toujours la même pour le même corps, et c'est alors seulement que la fusion peut commencer; secondement, ils restent à la même température pendant toute la durée de la fusion, quelle que soit la quantité de calorique qu'on leur fournisse; d'où il suit qu'ils absorbent ce calorique pour se fondre, et qu'ils le cachent dans leur intérieur, sans en laisser rien paraître au dehors. Ainsi, la *fixité de température*, et l'*absorption du calorique latent* sont

les deux conditions essentielles de la fusion. Ces phénomènes peuvent être facilement constatés sur les corps très fusibles, dont la température est accessible au thermomètre à mercure, et ils peuvent l'être encore sur les substances peu fusibles, dont on obtient des masses liquides assez considérables pour y plonger quelques-uns des pyromètres dont nous avons parlé. Il y avait près de cent ans que le thermomètre était inventé, que l'on ne connaissait pas encore, d'une manière certaine, l'invariabilité du point de fusion des corps; on croyait que la glace, par exemple, devait entrer en fusion à diverses températures, suivant la latitude ou l'élévation des lieux où elle était formée. La première condition de la fusion une fois démontrée, il fallut encore plus d'un demi-siècle pour constater l'autre, c'est-à-dire l'absorption du calorique latent; car ce fut en 1763 que Black mit cette vérité fondamentale dans tout son jour, et qu'il en fit voir les importantes conséquences. Il est visible que la quantité de calorique latent que prend un corps pour se fondre est proportionnelle à la masse de ce corps qui entre en fusion, et nous verrons plus loin qu'à masse égale, des corps différents prennent des quantités de calorique latent très différentes; ce qui suffit pour imprimer à chaque substance un caractère distinctif pareil à celui qui dérive de la densité ou des autres qualités primitives de la matière.

L'affinité chimique est cependant une cause qui peut faire changer le point de fusion des corps, mais il ne paraît pas qu'elle puisse modifier en rien l'absorption du calorique latent : ainsi, la neige ou la glace pilée étant, par exemple, à la température de -10° et en contact avec du sel ordinaire aussi à -10° , la fusion s'opère par la combinaison de ces deux corps, et la température s'abaisse de plus en plus; ce qui est une preuve évidente de l'absorption du calorique latent. C'est là le principe de la formation des *mélanges frigorifiques* dont nous occuperons plus tard. Dans les combinaisons de cette espèce, la limite du froid que l'on peut produire est déterminée par la température à laquelle les éléments de la combinaison cessent d'agir l'un sur l'autre. La neige et le sel, par exemple, n'ayant plus d'action sensible à 18 ou 20° au-dessous de 0, il est impossible d'obtenir avec ces éléments un froid plus grand que -18 ou -20° , puisqu'au delà de ce terme ils cessent de se combiner, et pour approcher de cette limite autant qu'il est possible, il faut que le calorique latent soit exclusivement fourni par la portion des éléments qui entrent en combinaison.

Ce qui arrive dans les mélanges frigorifiques se reproduit avec quelques modifications dans plusieurs procédés des arts, comme dans l'extraction des métaux, dans la fabrication du verre, et aussi dans les nombreux essais que l'on peut faire au chalumeau, pour la détermination chimique ou minéralogique de diverses substances. On emploie alors ce qu'on appelle *fondans*, c'est-à-dire des corps

qui ont la propriété d'accélérer la fusion des matières avec lesquelles ils sont en contact, à peu près comme le sel accélère la fusion de la glace ou de la neige. Le composé qui en résulte étant beaucoup plus fusible que n'est la substance à laquelle on ajoute le fondant, on peut en tirer parti plus facilement : tantôt on le destine à d'autres combinaisons chimiques, comme il arrive à la mine de fer, qui entre en fusion par le fondant et ensuite se désoxide et se carbonise pour se transformer en fonte; tantôt on le travaille immédiatement, comme le verre; tantôt on observe les nuances de sa couleur pour juger par là des éléments chimiques qui le constituent. M. Doberéiner a démontré, par exemple, qu'en mêlant 207 grammes de plomb, 118 d'étain, 284 de bismuth et 1617 de mercure, à la température de 17° le thermomètre descend de suite à -10° .

Un grand nombre de physiciens ont pris soin de déterminer les points de fusion des différents corps, et nous avons rassemblé, dans le tableau suivant, ceux de ces points de fusion qui sont les mieux constatés et qui paraissent être d'un usage plus fréquent. Nous avons déjà prévenu qu'il est impossible d'évaluer avec quelque confiance les degrés du pyromètre de Wedgwood en degrés centigrades.

Table des points de fusion de différentes substances, en degrés du pyromètre de Wedgwood et en degrés du thermomètre centigrade.

NOIRS	Degré du pyrom.	Degré centigrade.	NOMS	Degré du pyrom.	Degré centigrade.
DES SUBSTANCES.			DES SUBSTANCES.		
Tungstène.	170	+	Alliage, 1 étain, 4 bismuth.	141,3	
Chrome.	170	+	— 1 étain, 1 bismuth.	118,9	
Molybdène.	170	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Colombium.	170	+	— 1 étain, 1 bismuth.	107	
Naugensium.	160	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Nickel.	160	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Feu.	150	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Acier.	150	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Urbain.	150	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Os.	57	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Quartz.	57	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Argent.	558	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Antimoine.	432	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Zinc.	40	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Plomb.	334	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Bismuth.	271	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Etain.	250	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
Alliage, 5 étain, 4 bismuth, 1 de plomb.	194	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
— 3 étain, 1 de plomb.	189	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
— 3 étain, 1 de plomb.	185	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
— 2 étain, 1 de plomb.	190	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
— 1 étain, 1 de plomb.	231	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
— 1 étain, 1 de plomb.	289	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
— 3 étain, 1 bismuth.	210	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
— 2 étain, 1 bismuth.	187,7	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	
— 3 étain, 1 de plomb.	187,7	+	— 1 étain, 1 bismuth.	100	

324. *Solidification.* — Quand les liquides passent à l'état solide, on observe en général deux conditions correspondantes à celles de la fusion : premièrement la solidification s'opère à une température fixe, qui est celle de la fusion; secondement, tout le calorique latent, qui a été absorbé pendant

la fusion, est reproduit et dégagé pendant la solidification. Il suffit d'un thermomètre ou d'un pyromètre pour démontrer la première de ces vérités; quant à la deuxième, nous ne pourrions indiquer comment ou la constater par l'expérience que quand nous donnerions les moyens de mesurer les quantités de calorique latent. On sait cependant, et cette observation a été faite en 1724 par Fahrenheit, ou sait que, dans certaines circonstances, l'eau pure peut être amenée jusqu'à 10 ou 12° au-dessous de zéro, sans se congeler; c'est une sorte d'exception qui se présente dans quelques autres liquides et surtout dans les corps gras. Ce phénomène, qui a lieu quelquefois à l'air libre, se manifeste plus sûrement quand la surface du liquide ne supporte plus qu'une faible pression, produite par de l'air ou de la vapeur; aussi, pour l'observer, il convient d'enfermer le liquide dans des tubes que l'on scelle après y avoir fait le vide, ou de le placer sous le récipient de la machine pneumatique et ensuite de refroidir graduellement, en évitant, autant qu'il est possible, toute espèce d'agitation. Alors, après un certain degré de refroidissement, il suffit d'imprimer au liquide quelque secousse légère, ou de jeter dans sa masse quelques fragmens d'un corps solide quelconque, pour déterminer à l'instant une solidification plus ou moins complète. En même temps, le thermomètre, qui indiquait l'abaissement de température, s'élève subitement et remonte quelquefois jusqu'au terme naturel du changement d'état du corps. La rapidité de la solidification qui a eu lieu dans ces circonstances, et l'ascension du thermomètre, sont deux phénomènes faciles à expliquer : le calorique latent des premières parties qui se congèlent se porte sur les parties voisines, qui sont encore liquides; il les réchauffe, mais ne les réchauffe pas assez pour les empêcher de se congeler à leur tour; de là le double effet de la prompte solidification et du réchauffement. Les dissolutions du sulfate de soude présentent des phénomènes analogues : les dissolutions saturées à chaud laissent peu à peu déposer le sel de soude, lorsqu'elles se refroidissent à l'air libre; mais si on les enferme dans des tubes effilés que l'on scelle à la lampe, après les avoir purgés d'air par l'ébullition, le refroidissement ne donne plus de précipité, et dès que l'on brise la pointe effilée pour laisser entrer l'air, il y a précipité presque subit et élévation de température.

Quand le retour à l'état solide se fait au degré de chaleur ordinaire, il se fait toujours lentement et sans aucune élévation de température. Par exemple, quand l'eau gèle à 0, la congélation commence en général sur plusieurs points à la fois, et sur tous ces points, les premières molécules qui se gèlent donnent leur calorique latent aux molécules voisines, qui sont par là maintenues à l'état liquide pendant quelques instans de plus. C'est pourquoi on aperçoit d'abord des lames minces de glace, ou des aiguilles très fines, ou des filamens qui se croisent de mille manières dans la masse du liquide. A une certaine distance de ces premiers filamens, il s'en forme d'autres, et ainsi de suite jusqu'à ce que la chaleur latente se soit peu à peu dissipée et que le froid ait pu saisir successivement toutes les molécules liquides pour les réunir en une seule masse solide. Sans le calorique latent, la solidification des corps se ferait en un instant; ainsi la rapidité de la solidification dépend de l'abondance de la chaleur qui se dégage, et de la facilité avec laquelle elle peut se dissiper.

225. Une même substance liquide peut prendre, en se solidifiant, des aspects et des propriétés très différentes. Quand le phénomène se produit lentement et sans trouble, il arrive ordinairement que la substance cristallise et qu'elle prend la plus grande densité dont elle soit susceptible. Au contraire, quand le refroidissement est prompt ou quand la masse liquide est agitée de quelque manière, les molécules n'ont pas le temps de se grouper et de s'arranger, elles se précipitent brusquement et forment un solide dont toutes les parties intérieures sont dans un état plus ou moins forcé. Nous verrons, en parlant des *Actions moléculaires*, les phénomènes singuliers que présentent, sous ce point de vue, le soufre, le phosphore, le verre et plusieurs autres corps, lorsqu'ils sont subitement refroidis, à partir d'une température un peu haute, et surtout lorsqu'ils sont forcés à une brusque solidification. Cependant, que la solidification soit lente ou rapide, la plupart des corps diminuent de volume à l'instant de ce passage; tout le monde sait que l'eau éprouve un effet contraire, qu'elle augmente de volume en se congelant, et M. Erman a observé un phénomène analogue dans l'alliage de 4 parties de bismuth, 1 de plomb et 1 d'étain; il se dilate en se congelant, et il a un maximum de densité à l'état solide, vers 44°.

CHAPITRE II.

DES VAPEURS DANS LE VIDE.

226. Les vapeurs se forment lentement dans l'air et instantanément dans le vide. — Lorsqu'un liquide

est exposé au contact de l'air, il arrive ordinairement qu'il diminue peu à peu et qu'après un temps

plus ou moins long il disparaît tout-à-fait. Ainsi, l'eau qui couvre la terre après les pluies ne résiste pas au souffle d'un vent sec ou à l'action prolongée du soleil; elle se dissipe en quelques jours, et ce n'est pas seulement parce qu'elle s'infiltre dans le sol, mais aussi parce qu'elle s'exhale dans les airs. Au reste, on en voit la preuve dans ce qui arrive à un vase plein d'eau, exposé à l'air libre ou même dans un appartement; l'eau décroît d'instant en instant, et enfin il ne reste au fond du vase quelques corps étrangers qu'elle tenait en dissolution. Le même phénomène se produit avec une rapidité encore plus grande lorsqu'on fait bouillir un liquide par l'action du feu; le liquide n'est absorbé ni par le vase ni par le feu, et cependant il disparaît en quelques heures. De ces diverses observations l'on peut conclure que les liquides changent d'état, qu'ils deviennent invisibles et prennent une force expansive comme les gaz; c'est ce que l'on exprime en disant qu'ils se *vaporisent* ou se *réduisent en vapeurs*. Les corps sont d'autant plus *volatils* qu'ils se vaporisent ou qu'ils se volatilisent plus promptement et à des températures moins élevées.

On peut remarquer aussi que, dans certains cas, ce n'est pas le liquide tout entier qui passe à l'état de vapeur. Cela arrive lorsqu'il est un mélange de plusieurs corps différens qui se peuvent séparer par l'évaporation; alors les parties plus volatiles s'exhalent en plus grande abondance, et ce qui reste n'est plus composé des mêmes élémens ou du moins il n'en est plus composé dans les mêmes proportions.

Pendant long-temps on a supposé que les vapeurs ne pouvaient ni se former ni subsister par elles-mêmes, mais qu'elles prenaient naissance à la surface des liquides par l'action dissolvante de l'air, et que cette même cause était encore nécessaire pour les maintenir suspendus dans l'atmosphère. Pour montrer la fausseté de cette opinion et en même temps pour étudier les propriétés remarquables des vapeurs, le moyen le plus simple consiste à leur offrir un espace vide d'air et de gaz, dans lequel elles puissent se développer librement par elles-mêmes. Le vide barométrique est éminemment propre à ce genre d'expériences; non seulement parce qu'il est aussi parfait qu'il soit possible, mais aussi parce que, le colonne de mercure étant mobile, elle peut indiquer, par sa dépression, l'énergie de la force expansive qui s'exerce sur son sommet.

Supposons donc que, dans une large cuvette *cc'* (Fig. 197), on dispose deux baromètres *s* et *s'*, qui donnent très exactement la pression de l'atmosphère, et qu'ensuite, au moyen d'une pipette recourbée, on fasse passer une petite quantité d'eau dans le tube du baromètre *s'*. L'eau s'élève, en vertu de sa légèreté spécifique, elle arrive bientôt dans le vide de Toricelli, et, à l'instant, on voit le sommet de la colonne qui descend de plusieurs millimètres. Ce n'est pas le poids de la petite colonne d'eau supérieure qui a pu déprimer le mer-

cure, ce n'est pas non plus l'air qu'elle aurait pu contenir et qui se serait dégagé; car nous la supposons parfaitement purgée d'air. Il faut donc que la substance propre de l'eau se soit vaporisée dans le vide, et que sa vapeur ait une propriété pareille à celle que nous avons appelée la *force expansive*, la *force élastique* ou la *tension des gaz*; car elle agit comme ferait une petite quantité d'air que l'on aurait fait passer au-dessus du mercure.

La mesure de cette force élastique est donnée par la *dépression*, c'est-à-dire par l'abaissement du sommet *t* au-dessous du sommet *c*, ou en général par la différence de hauteur entre le vrai baromètre *s* et le baromètre à vapeur *s'*; en effet, si le sommet *t* est déprimé, par exemple, de quinze millimètres au-dessous du sommet *c*, c'est qu'il s'est développé dans le vide au-dessus de *t* une force élastique qui fait équilibre à cette colonne de mercure de quinze millimètres.

Un troisième baromètre *s''*, que l'on mettrait à côté des deux premiers et dans lequel on ferait passer un autre liquide, de l'éther sulfurique par exemple, éprouverait aussi une dépression instantanée, et une dépression beaucoup plus grande que celle du baromètre *s'*; car, en faisant l'expérience à la température ordinaire, le sommet tomberait à peu près à la moitié de la hauteur du baromètre *s*. D'où il résulte que, dans ces circonstances, la force élastique de la vapeur d'éther sulfurique est à peu près une demi-pression atmosphérique.

M. Gay-Lussac a fait construire un appareil qui est très commode pour montrer au même instant les différentes forces élastiques des différentes substances et pour en donner la mesure. La figure 200 en représente une coupe verticale. *aa'* est un axe en bois ou en fer, qui peut tourner sur lui-même en s'appuyant en *a*, au fond d'une large cuvette *cc'*, et en *a'*, à l'extrémité du support *rr*; *d* et *d'* sont deux disques solides, fixés perpendiculairement à l'axe et portant de petites ouvertures correspondantes, dans lesquelles on fait tenir des tubes barométriques; *rr'* est une règle divisée qui peut monter ou descendre, et dont l'extrémité inférieure est terminée en pointe, afin qu'au moment de l'expérience on puisse l'amener plus sûrement à effleurer le niveau du mercure; *e* est un vernier qui parcourt toute la longueur de la règle et au moyen duquel on estime les vingtièmes de millimètre. Dans l'un des baromètres, le vide est au-dessus de la colonne, dans les autres on fait passer des corps différens, de l'eau, de l'alcool, des éthers, du camphre, du musc, etc.; et l'on reconnaît ainsi que les vapeurs de tous ces corps se forment instantanément dans le vide, et qu'elles y prennent des forces élastiques différentes. Pour en avoir la mesure exacte, il suffit de faire tourner l'appareil et d'amener vis-à-vis la règle divisée le tube dont on veut connaître la dépression.

227. Du maximum de tension des vapeurs. — II

est évident que la force expansive des vapeurs s'exerce, dans tous les sens, comme la force expansive des gaz; il est évident aussi qu'elle s'exerce indéfiniment, c'est-à-dire qu'une quantité de vapeur, quelque petite qu'elle soit, se répand de toutes parts dans un espace vide, quelque grand qu'il puisse être, et qu'elle va s'arrêter aux parois qui limitent cet espace en y exerçant une pression plus ou moins forte. Ainsi la moindre parcelle d'eau devient capable, en se vaporisant, de prendre un volume de plusieurs milliers de mètres cubes, comme ferait la moindre parcelle d'air en se répandant dans cet espace. Mais si les vapeurs ont une force expansive indéfinie, par laquelle elles peuvent prendre des volumes indéfiniment grands, elles n'ont pas une force élastique indéfiniment croissante, par laquelle elles puissent résister aux pressions qu'on exerce sur elles, et se réduire à prendre des volumes de plus en plus petits : nous allons voir en effet que, de la vapeur étant donnée, si on essaie de la comprimer, pour augmenter sa force élastique, on arrive à un point où cette vapeur se condense et repasse à l'état liquide plutôt que de prendre une force élastique plus grande; c'est cette limite de résistance à être comprimée que l'on appelle la tension maximum de la vapeur. Cette vérité fondamentale peut être démontrée facilement, au moyen du baromètre à cuvette profonde, qui est représenté figure 106; son tube τ est très long et sa cuvette c a plusieurs pieds de profondeur. Après avoir fait bouillir, dans toute sa longueur, le tube plein de mercure, on achève de le remplir avec une colonne d'éther de deux ou trois centimètres d'épaisseur, et ensuite on le retourne verticalement pour le plonger dans la cuvette. L'éther gagne la partie supérieure du tube, une partie reste à l'état liquide et l'autre se vaporise dans le vide, de manière à produire une dépression considérable. La colonne m aura, par exemple, 400 millimètres de hauteur, au lieu de 760 qu'elle prendrait, s'il n'y avait pas de vapeur. Cela fait, on enfonce le tube dans la cuvette, pour essayer de réduire à un moindre volume la vapeur qui s'est formée, et on observe alors deux phénomènes remarquables : premièrement, la colonne de mercure m conserve exactement la même hauteur, ce qui prouve que la force élastique de la vapeur reste la même; secondement, la couche d'éther liquide augmente sensiblement d'épaisseur, à mesure que l'on enfonce, ce qui prouve que la vapeur se condense plutôt que de se laisser comprimer dans un moindre espace. Enfin, si l'on enfonce le tube au point de réduire de plus en plus la chambre barométrique, toute la vapeur disparaît et repasse à l'état liquide, sans que le sommet s ait éprouvé le moindre abaissement. Donc la vapeur d'éther a un maximum de force élastique. On peut même remarquer que c'est d'elle-même qu'elle prend ce maximum, sans qu'il soit besoin de la comprimer pour la forcer à l'atteindre; et il en est toujours ainsi

tant qu'elle est en contact avec le liquide qui lui donne naissance; car, en soulevant le tube pour agrandir la chambre barométrique, on observe encore que la colonne de mercure conserve la même hauteur m , tandis que la couche liquide diminue de plus en plus. Ce qui est une preuve visible que la vapeur se forme pour remplir le nouvel espace qui lui est offert et pour arriver toujours au maximum de tension. Mais si le tube peut être assez soulevé pour que le liquide disparaisse complètement, alors le sommet s de la colonne de mercure commence à s'élever, la dépression devient moindre, et, par conséquent, la force élastique de la vapeur cesse d'être à son maximum.

On peut même démontrer qu'à partir de cet instant les tensions sont en raison inverse des volumes, et qu'ainsi les vapeurs se compriment comme les gaz, en suivant la loi de Mariotte, aussi long-temps du moins qu'elles ne sont pas pressées au point de se condenser. Les autres liquides, soumis aux mêmes épreuves, se comportent comme l'éther; seulement leurs tensions maximum sont très différentes.

228. *Équilibre de tension dans un espace inégalement chaud.* — Il est facile de reconnaître que la température a une grande influence sur la tension maximum des vapeurs; car en faisant les expériences précédentes à différents degrés de chaleur, la colonne barométrique éprouve des dépressions très inégales. Par exemple, avec l'éther sulfurique, la dépression est à peu près de 180 millimètres à 0 de température, tandis qu'elle est de 630 à la température de 30°. Les phénomènes qui se produisent sous nos yeux nous fournissent d'ailleurs des preuves nombreuses de cette vérité : la vapeur d'eau n'a qu'une faible tension lorsqu'elle se forme à la surface des lacs ou à la surface de la mer; elle a une tension plus forte lorsqu'elle se forme par ébullition, puisqu'elle supporte alors la pression de l'atmosphère; enfin, à de hautes températures, cette tension devient si puissante qu'elle peut non-seulement lancer des projectiles du plus gros calibre, mais encore lancer au loin des machines entières et des masses énormes du poids de plusieurs quintaux; les explosions des machines à vapeur en offrent de trop nombreux et de trop terribles exemples. D'après cela, on peut se demander quelle serait la tension maximum de la vapeur, dans une espèce de forme quelconque, dont les diverses parties seraient à des températures différentes. En supposant que cet espace n'ait pas une grande hauteur verticale et que la vapeur soit, comme il arrive toujours, d'une faible densité, il faut, par les conditions d'équilibre des fluides élastiques (72), que la tension soit la même dans tous les points où il y a de la vapeur; et, comme dans les points les plus froids la tension maximum ne peut jamais être aussi grande que dans les points les plus chauds, il faut bien que, dans ces derniers, la tension cesse d'être un maximum et qu'elle diminue jusqu'à devenir

égale à la tension maximum des points les plus froids. Ainsi, dans un espace inégalement chaud, quand l'équilibre est établi, la tension de la vapeur est la même dans tous les points, et partout elle est égale à la tension maximum des parties de cet espace qui sont à la température la plus basse. Ce principe est important pour toutes les recherches qui vont suivre et où nous essaierons de trouver les relations qui existent entre la force élastique des vapeurs et leur température.

229. Mesure de la force élastique de la vapeur d'eau. — On mesure la tension de la vapeur d'eau, entre 0 et 100°, au-dessous de 0, et au-dessus de 100° jusqu'aux plus hautes températures. Chacune de ces déterminations exige un appareil différent.

Entre 0 et 100°. — L'appareil se compose de deux tubes barométriques placés très près l'un de l'autre et plongeant dans la même cuvette. Le premier de ces tubes est un baromètre parfait; le deuxième est un baromètre à vapeur, c'est-à-dire un baromètre au-dessus duquel on a fait passer une petite colonne d'eau qui s'est en partie vaporisée sous le vide. Ces deux tubes sont enveloppés d'un manchon de verre, ou plutôt d'un autre tube qui plonge aussi dans la cuvette, et qui a 3 ou 4 pouces de largeur, et plus de 30 pouces de hauteur. On met de l'eau dans le manchon jusqu'à ce qu'elle dépasse les sommets des deux tubes barométriques, et ensuite on la refroidit et on la réchauffe graduellement, pour qu'elle parcoure tous les degrés depuis jusqu'à 100°. Des thermomètres, placés à diverses hauteurs, indiquent à chaque instant sa température, et il est évident que cette température est aussi celle du baromètre parfait, celle du baromètre à vapeur, et celle de la vapeur elle-même, qui se forme à son sommet. Pour avoir la force élastique de cette vapeur correspondante à chaque degré, il suffit d'observer la dépression du baromètre à vapeur, par rapport au baromètre parfait, et l'on y parvient aisément au moyen d'une règle verticale qui est au dehors du manchon et sur laquelle se meuvent deux lunettes horizontales, dont l'une se dirige au sommet du baromètre parfait, et l'autre au sommet du baromètre à vapeur. L'intervalle des deux lunettes est la mesure de la dépression; il suffit seulement d'y faire une correction de température pour la ramener à 0, car la colonne de mercure qui exprime la tension des vapeurs doit toujours être réduite à 0, comme celle qui exprime la hauteur du baromètre. Tel est le procédé très simple qui fut imaginé par Dalton de Manchester, en 1805, pour étudier les vapeurs, et qui lui servit à établir enfin la vraie théorie de leur formation et de leur élasticité.

Au-dessus de 0. — La glace elle-même se vaporise comme l'eau; plusieurs observations semblaient indiquer ce résultat, mais c'est à M. Gay-Lussac que nous devons un appareil propre à le constater d'une manière directe, et, de plus, à donner la mesure exacte de la tension des vapeurs

qui se forment sur la glace à toutes les températures plus basses que 0. Cet appareil est représenté figure 189; il se compose de deux baromètres plongeant dans la même cuvette, et d'un support au-dessus duquel est un matras tubulé *m*, rempli d'un mélange frigorifique, et d'un thermomètre *t*, qui en donne la température; l'un des baromètres contient une petite colonne d'eau, et sa partie vide se recourbe pour pénétrer dans le mélange du matras et en prendre la température. Ainsi, la chambre barométrique se compose d'une partie froide, dont la température est connue et d'une autre partie qui est à la température ambiante; donc, d'après le principe précédent (228), la tension maximum de la vapeur est celle qui convient à la température du mélange réfrigérant. On voit même, par cette expérience, comment s'établit l'équilibre de tension; car on voit la petite colonne d'eau qui repose au sommet du mercure, diminuer de plus en plus et disparaître complètement; elle disparaît parce que la vapeur qu'elle donne ayant, au moment de sa formation, une force expansive plus grande que la vapeur qui est refroidie à l'extrémité du tube, elle n'a rien qui l'arrête, et elle va se condenser et se congeler à son tour dans l'espace froid. Quelquefois même la rapidité de l'évaporation est si grande que la petite colonne d'eau se trouve congelée sur le mercure, et ne disparaît alors qu'après un temps très long. Après des baromètres on voit une règle verticale sur laquelle se meut une lunette horizontale, avec laquelle on observe la dépression.

Au-dessus de 100°. — Pour montrer qu'au-dessus de 100° la tension de la vapeur d'eau est plus grande qu'une pression atmosphérique, on peut employer un simple tube recourbé (Fig. 198), dont la courte branche est fermée en *s*; on le remplit de mercure jusqu'à la demi-hauteur de la branche ouverte, et on fait passer en *a* une petite colonne d'eau; ensuite on plonge l'appareil dans un bain d'huile dont la température est plus haute que 100°; bientôt la vapeur se forme, et sa force élastique est égale à une pression atmosphérique, plus la différence qui existe entre les deux niveaux du mercure dans la branche ouverte et la branche fermée. Mais pour mesurer exactement les tensions qui s'élèvent à plusieurs atmosphères et les températures correspondantes, on rencontre de très grandes difficultés. La science ne possédait sur ce point que des données vagues et incertaines, lorsque MM. Arago et Dulong furent chargés par l'Académie des Sciences de déterminer les forces élastiques de la vapeur d'eau jusqu'aux plus hautes pressions dont on fasse usage dans les applications industrielles. Ce grand travail a été terminé en 1830; avant d'en rapporter les résultats, nous allons donner une idée des appareils qui ont servi à ces importantes déterminations.

Production de la vapeur. — La vapeur est produite dans une forte chaudière en tôle CC' (Fig. 223, planche 10), contenant environ 80 litres. Dans sa

portion cylindrique qui est la plus faible, elle a 13 millimètres d'épaisseur. La même figure représente le fourneau FF', la grille G, et le tuyau T par lequel s'échappe la fumée.

Mesure des températures. — Deux canons de fusil E et R, scellés au couvercle, ouverts en haut, fermés en bas et pleins de mercure, servent à indiquer les températures de l'eau et de la vapeur. Dans le mercure qu'ils contiennent sont établis en permanence des thermomètres dont les tiges, recourbées horizontalement au sortir des canons, sont maintenues à une température constante au moyen d'un courant d'eau. Cette disposition se voit plus en grand dans la figure 224.

Mesure des tensions. — La vapeur formée au-dessus de l'eau, à une température connue, s'élève par le petit tube vertical BB' pour venir exercer sa pression en U, au sommet de la colonne d'eau qui remplit le tube incliné UDH, et toute la partie supérieure du vase manométrique VV'. Cette pression se transmet sur la surface SS' du mercure, et enfin à l'air du manomètre MM' qui est le même que nous avons décrit précédemment (page 70). Comme on connaît la pression correspondante à une position donnée du sommet de la colonne de mercure dans le manomètre, on en déduit la force élastique de la vapeur. Il y a seulement deux corrections à faire, l'une relative à la hauteur verticale de la colonne d'eau, depuis son sommet U jusqu'à sa base SS', et l'autre relative à la hauteur variable du mercure dans le vase VV'. C'est pour faire ces corrections avec exactitude que l'on voit sur la seconde platine du vase VV' un petit tube en verre NN' communiquant en outre au tube UDH, et dans lequel on peut observer le niveau du mercure au moyen du curseur qui parcourt la règle verticale ZZ'.

A mesure que la vapeur arrive en U, elle se condense et retombe dans la chaudière; mais il n'en peut résulter aucune erreur, car on a soin de maintenir le tube UDH à une température constante dans sa longueur UD par un courant d'eau.

MM. Arago et Dulong ont ainsi déterminé les tensions de la vapeur d'eau jusqu'à *vingt quatre* atmosphères. Ils ont reconnu ensuite que les relations qui existent entre les tensions et les températures peuvent être représentées avec une grande approximation par la formule

$$F = (1 + 0,7153.T)^5$$

F représente la tension exprimée en atmosphères. T représente les températures supérieures à 100°, exprimées en poudant pour unité l'intervalle de 100°. Ainsi, pour connaître la force élastique correspondante à 136°, par exemple, il faudrait faire $T = 0,36$.

Il paraît bien probable que cette formule représente d'une manière assez approchée les tensions et les températures correspondantes jusqu'à 50 atmosphères.

On ne pourrait pas sans doute se fier à ces indications pour des tensions plus fortes; cependant le dernier des tableaux suivants a été calculé jusqu'à mille atmosphères; s'il ne représente pas la marche des phénomènes, il représente au moins la marche de la formule.

POUR LES TABLEAUX.

Forces élastiques de la Vapeur d'eau depuis — 20° jusqu'à 100° centigrades.

deg.	mm.	atm.	deg.	mm.	atm.
20	1,353	0,0048	40	84,570	0,1662
15	1,879	0,0056	50	88,735	0,1906
10	2,631	0,0066	55	93,301	0,12676
5	3,660	0,0078	52	98,075	0,13325
0	5,059	0,0099	53	103,060	0,13999
1	5,295	0,0075	54	108,070	0,14710
2	5,719	0,0074	55	113,710	0,15460
3	6,123	0,0080	56	119,590	0,16250
4	6,575	0,0089	57	125,310	0,17075
5	6,917	0,0094	58	131,500	0,17866
6	7,596	0,0101	59	137,939	0,18736
7	7,671	0,0107	60	144,660	0,19655
8	8,375	0,0114	61	151,700	0,20640
9	8,909	0,0122	62	158,960	0,21686
10	9,473	0,0129	63	166,560	0,22699
11	10,074	0,0137	64	174,470	0,23726
12	10,707	0,0146	65	182,710	0,24823
13	11,578	0,0155	66	191,270	0,25986
14	12,067	0,0163	67	200,180	0,27196
15	12,867	0,0170	68	209,560	0,28454
16	13,650	0,0176	69	219,060	0,29761
17	14,658	0,0197	70	229,070	0,31121
18	15,355	0,0209	71	239,550	0,32532
19	16,288	0,0212	72	250,750	0,33996
20	17,314	0,0233	73	261,650	0,35518
21	18,517	0,0250	74	273,050	0,37099
22	19,447	0,0263	75	285,070	0,38632
23	20,577	0,0284	76	297,570	0,40278
24	21,805	0,0297	77	310,690	0,41884
25	23,060	0,0314	78	324,890	0,43660
26	24,452	0,0334	79	339,790	0,45508
27	25,881	0,0353	80	355,000	0,47534
28	27,590	0,0374	81	367,000	0,48600
29	29,015	0,0396	82	382,300	0,49850
30	30,615	0,0418	83	399,290	0,51110
31	32,410	0,0440	84	418,120	0,52465
32	34,291	0,0465	85	438,710	0,53925
33	36,188	0,0492	86	460,750	0,55405
34	38,256	0,0520	87	484,360	0,56996
35	40,595	0,0549	88	509,000	0,58696
36	43,745	0,0581	89	535,380	0,60461
37	47,038	0,0612	90	563,780	0,62365
38	50,579	0,0646	91	594,490	0,64405
39	54,127	0,0681	92	626,850	0,66586
40	57,998	0,0720	93	661,740	0,68906
41	62,172	0,0763	94	699,280	0,71365
42	66,658	0,0810	95	739,600	0,73965
43	71,467	0,0861	96	782,850	0,76705
44	76,591	0,0916	97	829,290	0,79585
45	82,031	0,0974	98	879,000	0,82605
46	87,785	0,1035	99	932,400	0,85765
47	93,855	0,1100	100	989,700	0,89065
48	100,240	0,1169			

DEUXIÈME TABLEAU.

Forces élastiques de la vapeur d'eau et températures correspondantes

De 1 à 24 atmosphères d'après l'observation,
Et de 24 à 50 pour le calcul.

	Forces élastiques en atmosphères de 76 centimètres de mercure.	Températures correspondantes en degrés centigrades.	Pression sur un centimètre carré en kilogrammes.	Forces élastiques exprimées en atmosphères.	Températures correspondantes en degrés centigrades.	Pression sur un centimètre carré en kilogrammes.
1	100	103,5	15	195,7	13,429	15,429
1 1/2	112,2	113,19	15	197,19	14,561	16,561
2	121,4	120,66	15	200,38	15,493	17,493
2 1/2	126,8	126,82	16	203,60	16,578	18,578
3	133,1	130,99	17	206,57	17,584	19,584
3 1/2	138,6	135,15	18	209,4	18,594	20,594
4	143,4	140,132	19	212,1	19,617	21,617
4 1/2	149,06	145,16	20	215,7	20,660	22,660
5	153,08	150,21	21	217,2	21,693	23,693
5 1/2	156,8	155,681	22	219,6	22,736	24,736
6	160,2	160,198	23	221,9	23,739	25,739
6 1/2	163,48	165,714	24	224,2	24,792	26,792
7	166,5	170,231	25	226,3	25,753	27,753
7 1/2	169,37	175,717	26	228,2	26,730	28,730
8	172,1	180,263	27	230,5	27,735	29,735
9	177,1	185,297	40	233,53	31,320	31,320
10	181,8	190,33	45	239,32	34,365	34,365
11	186,03	195,365	50	242,89	37,630	37,630
12	190,0	17,596				

TROISIÈME TABLEAU.

Forces élastiques de la vapeur d'eau et températures correspondantes de cent à mille atmosphères, d'après la formule empirique.

Forces élastiques en atmosphères.	Températures correspondantes.	Pression sur 1 centimètre carré en kilogrammes.	Forces élastiques exprimées en atmosphères.	Températures correspondantes.	Pression sur 1 centimètre carré en kilogrammes.
100	514,36	103,5	600	473,71	619,8
200	367,58	206,60	700	478,53	712,1
300	297,65	309,90	800	482,7	816,4
400	253,37	413,20	900	505,16	919,7
500	221,70	516,50	1000	510,76	1035,6

230. *Tension des vapeurs des divers liquides.* — On voit dans le tableau précédent qu'au point d'ébullition la vapeur d'eau a une tension qui fait équilibre à une pression atmosphérique; cette propriété est tout-à-fait générale; la tension de la vapeur qui se forme par ébullition est toujours égale à la pression qui s'exerce sur la surface du liquide; car si elle était moindre, la vapeur ne pourrait ni se former, ni subsister en bulle au milieu de la masse liquide, et si elle était plus forte, elle se serait formée plus tôt, rien n'empêchant qu'elle se forme dès l'instant qu'elle peut vaincre la pression. A l'ébullition les vapeurs de tous les liquides ayant des tensions égales, M. Dalton avait pensé qu'en s'écartant d'un même nombre de degrés au-dessus

et au-dessous de ce point, les tensions ne cesseraient pas d'être encore égales entre elles. Ainsi, d'après cette loi de Dalton, et avec la table des tensions de la vapeur d'eau, il suffirait d'avoir le point d'ébullition d'un liquide ou la tension de sa vapeur à une température quelconque pour déterminer sa tension à toutes les températures possibles. Par exemple, l'alcool ayant son point d'ébullition à 78°, la tension de sa vapeur à 113°, c'est-à-dire à 35° au-dessus de son point d'ébullition, serait la même que la tension de la vapeur d'eau à 133°, et par conséquent de 2330^{mm} ou 3 atmosphères; et à 0, c'est-à-dire à 78° au-dessous de son point d'ébullition, sa tension serait la même que celle de la vapeur d'eau à 100 — 78 ou à 22°, et par conséquent de 19^{mm}, 447. Pareillement l'éther sulfurique ayant à 20° une force élastique de 431^{mm}, 710, et l'eau ayant la même tension à 85°, il en résulterait qu'à 30° l'éther sulfurique aurait la même tension que la vapeur d'eau à 95°, et à 35° la même tension que la vapeur d'eau à 100°, etc. Mais il résulte des observations de plusieurs physiciens que cette loi n'est pas absolument rigoureuse; à de grandes distances des points d'ébullition elle commence à s'écarter sensiblement de la vérité, et s'il est toujours commode de s'en servir lorsqu'on ne veut que des approximations, il serait nécessaire de l'abandonner lorsqu'on voudrait de l'exactitude. Il est donc à souhaiter que, du moins pour les liquides les plus communs, les physiciens dressent des tables de tension pareilles à la table des tensions de la vapeur d'eau.

231. *Densité de la vapeur d'eau.* — Entre tous les moyens qui ont été employés pour obtenir la densité de la vapeur d'eau, celui de M. Gay-Lussac paraît le plus simple et le plus rigoureux; il consiste à chercher directement le poids, le volume, la température et la tension d'une quantité de vapeur donnée. Pour cela on se sert de l'appareil qui est représenté dans la figure 201. C'est un fourneau F sur lequel repose une chaudière C en fonte dont le bord B a été travaillé de manière à former un plan qu'on ajuste avec un niveau dans la direction horizontale; G est une cloche graduée, de trois ou quatre décimètres de longueur, plongeant dans le bain de mercure de la chaudière; MM est un manchon de verre dans lequel on verse un liquide qui enveloppe la cloche dans toute sa longueur, depuis le niveau extérieur du mercure, et qui la recouvre à son sommet; FF est une règle divisée qui se met verticalement au moyen de la traverse H, dont la face plane se pose exactement sur le bord horizontal de la chaudière. La cloche est pleine de mercure bouilli, et en outre on y fait passer une petite ampoule de verre A, scellée par les deux bouts, et presque entièrement remplie d'eau. On met des charbons sous la chaudière; le mercure, l'ampoule et l'eau du manchon s'échauffent graduellement, et divers thermomètres donnent à chaque instant leur température commune. A un certain instant

l'ampoule crève par l'effort de la dilatation de l'eau qu'elle contient, la vapeur se forme au-dessus de la cloche, le mercure est déprimé, et on pousse la température jusqu'à ce que l'eau soit complètement vaporisée, c'est une condition nécessaire. Alors on maintient les choses dans cet état pour accomplir toutes les observations.

1^o. L'eau étant toute vaporisée, on connaît le poids de la vapeur, car on a eu soin de peser l'ampoule vide et de la peser ensuite après l'avoir remplie; la différence des deux pesées est le poids de l'eau, et par conséquent celui de la vapeur.

2^o. On observe le nombre des divisions de la cloche qu'occupe la vapeur; chacune de ces divisions ayant une capacité connue à la température σ , on trouvera facilement, par le moyen de la dilatation du verre, sa capacité pour la température où l'on opère, et de la sorte on aura le volume réel de la vapeur.

3^o. Les thermomètres indiquent la température du liquide du manebon et celle de l'eau vaporisée dans la cloche.

4^o. Enfin, on observe la tension de la vapeur au moyen de la règle r *r*. D'abord on la fait monter ou descendre, de manière que sa pointe inférieure vienne affleurer la surface du mercure de la chaudière, et ensuite on fait marcher le *royant* v jusqu'à ce que le rayon visuel rase le sommet de la colonne du mercure de la cloche. La longueur qui se trouve entre la pointe et le *royant* est la hauteur de la colonne soulevée, on la réduit à σ , on la retranche de la hauteur actuelle du baromètre, pareillement réduite à σ , et la différence est la dépression de la colonne barométrique ou la force élastique de la vapeur. Si cette force approchait trop de la tension maximum pour la température à laquelle on opère, il faudrait craindre que toute l'eau ne fût pas vaporisée, et chauffer davantage pour se mettre à l'abri de cette chance d'erreur.

Ayant ainsi le poids d'un volume donné de vapeur à une température et sous une pression connue, on en déduit aisément le poids d'un centimètre cube. Or, le poids d'un centimètre cube d'air, soumis aux mêmes circonstances de température et de pression, est facile à trouver par la formule que nous avons donnée (192); lorsqu'on sait qu'à σ , et sous la pression de 760^{mm}, un centimètre cube d'air sec pèse 0^g,0012990505, ou ce qui revient au même que sa densité est $n = 0,0012990505$. On pourra donc avoir le rapport du poids de la vapeur au poids de l'air, pris sous le même volume, à la même température et à la même pression, c'est-à-dire la densité de la vapeur par rapport à celle de l'air, et M. Gay-Lussac a trouvé qu'elle en est les $\frac{1}{170}$.

Il est facile ainsi de trouver le volume que doit occuper 1^g de vapeur à la température de 100°, et sous la pression maximum de 760^{mm}.

Car un centim. c. d'air à 0 pesant 0^g,0012990505 sous la pression de 760^{mm}, et ce centimètre cube

devenant 1,375 lorsqu'il passe à 100° sous la même pression, l'on voit qu'alors

$$1^{\text{g}},375 \text{ pèse } 0^{\text{g}},0012990505;$$

Et par conséquent que,

$$1,375 \\ 1^{\text{g}} \text{ occupe un volume } \frac{0,0012990505}{1,375} = 0,000945,47.$$

Ainsi, 1^g de vapeur à 100° sous 760^{mm}, doit occuper les $\frac{8}{5}$ de 1058^{cc},47 ou 1693^{cc},55; donc un centimètre cube d'eau, qui pèse 1^g, prend en se vaporisant à 100° un volume de 1693^{cc},55, c'est-à-dire un volume qui est environ 1700 fois plus grand; pourvu toutefois que sa force élastique soit maximum.

Enfin, avec ces données on peut trouver la densité n' de la vapeur d'eau à une température quelconque t , et sous une pression quelconque p ; car, en représentant par n sa densité à 100° sous la pression de 760^{mm}, on verra, par un raisonnement analogue à celui que nous avons déjà fait (183), que

$$n' = n \frac{p}{760} \frac{(1 + 100\alpha)}{(1 + nt)}$$

n étant le coefficient de la dilatation, qui est commun aux gaz et aux vapeurs, et qui est 0,00375.

Par cette formule on aura la densité au maximum de tension, lorsqu'après avoir donné à t une valeur, on donnera à p la valeur en millimètres de la tension maximum correspondante.

On peut s'étonner que beaucoup d'auteurs prennent la peine de discuter longuement la question de savoir si les densités de la vapeur sont ou ne sont pas proportionnelles aux tensions. On voit par la formule précédente qu'il faut bien que les densités soient proportionnelles aux tensions, lorsque les vapeurs sont réduites à une même température, et qu'il est impossible que cela soit lorsque l'on considère les vapeurs à des températures différentes; et cette formule repose sur deux vérités que personne ne conteste; savoir, premièrement, qu'au-dessous du maximum de tension, les vapeurs se dilatent comme les gaz; et secondement, qu'elles se compriment suivant la loi de Mariotte.

En calculant les densités de la vapeur d'eau pour diverses températures, on voit qu'elles vont croissant d'une manière très rapide; d'où il résulte qu'à un certain degré de chaleur la vapeur doit avoir une densité que ne surpasse que de très peu la densité du liquide lui-même. Cette conséquence a été vérifiée et rendue frappante par une expérience curieuse de M. Cagniard de la Tour. Un tube de verre très fort, étant rempli d'eau à peu près au quart de sa capacité, puis purgé d'air, et ensuite scellé, on l'expose à une température graduellement croissante; alors à un certain degré de chaleur l'eau semble disparaître, le tube est comme vide; mais en refroidissant un peu, le liquide reparaît presque subitement. On pourrait se faire une sorte de jeu de ces alternatives d'apparition et de disparition, si l'on ne devait pas, en les répétant, craindre de dangereuses explosions.

C'est à une température voisine de celle de la fusion du zinc que l'eau se vaporise complètement dans un espace à peu près quadruple de son volume à l'état liquide; en même temps elle agit sur le verre, et lui ôte sa transparence en dissolvant sans doute quelques-uns de ses éléments. D'après cela on peut présumer qu'à la température rouge, la densité de la vapeur d'eau à son maximum de tension est peu différente de la densité de l'eau liquide, et qu'alors elle a une force expansive de plusieurs centaines, et peut-être de quelques milliers d'atmosphères.

En parcourant les tableaux suivants, on pourra prendre une idée de l'accroissement de la densité de la vapeur d'eau, à mesure que la température s'élève.

PREMIER TABLEAU.

Densité et volume de la vapeur d'eau, au maximum de tension, en prenant pour unités la densité et le volume de l'eau liquide à 0.

Depuis — 20° à 100°.

Température.		Densité.	Volume.	Température.		Densité.	Volume.
deg.	min.			deg.	min.		
— 20	1 333	0,00001354	6502,64	49	84,370	0,00007607	1315,54
— 15	1 879	212	4708,08	50	88,751	7970	125,36
— 10	2 631	292	3529,83	51	93,501	8354	110,71
— 5	3 660	398	2513,41	52	98,873	8735	114,74
0	5 039	540	1823,23	53	103,069	9171	109,01
1	5 293	573	1711,03	54	109,720	9606	103,10
2	5 718	608	1603,32	55	113,710	0,00010004	99,96
3	6 123	616	1548,17	56	119,300	10035	95,01
4	6 523	666	1450,66	57	125,310	11011	90,82
5	6 917	727	1374,88	58	131,300	11535	86,60
6	7 306	772	1308,67	59	137,940	12064	83,03
7	7 691	815	1252,14	60	145,660	12599	79,57
8	8 073	867	1195,00	61	154,700	13179	75,64
9	8 459	919	1097,90	62	164,960	13760	72,67
10	8 873	974	1016,70	63	166,560	14374	69,57
11	10 071	0,00001652	992,05	64	171,470	15010	66,82
12	10 707	1092	913,61	65	181,710	15668	64,28
13	11 378	1157	860,79	66	187,270	16356	61,84
14	12 067	1224	816,66	67	200,180	17060	59,60
15	12 837	1299	770,08	68	209,530	17767	56,89
16	13 650	1372	726,11	69	219,060	18466	53,88
17	14 466	1451	699,23	70	229,070	19153	51,67
18	15 283	1524	672,01	71	239,330	20735	49,57
19	16 098	1612	643,41	72	250,230	21013	47,50
20	16 914	1716	607,23	73	261,630	21889	45,49
21	17 312	1811	552,06	74	273,030	22794	43,87
22	18 117	1914	512,60	75	283,070	23760	42,04
23	20 377	2021	469,67	76	297,370	24767	40,08
24	21 900	2145	429,77	77	310,490	25809	38,09
25	23,080	2252	404,11	78	325,890	26739	37,34
26	24 052	2379	370,83	79	357,760	27789	35,99
27	25 881	2507	339,63	80	357,080	28849	33,62
28	27,590	2635	308,58	81	367,080	30075	33,51
29	29,045	2794	275,96	82	387,340	31195	32,05
30	30,615	2968	250,01	83	398,910	32390	30,97
31	32 410	3097	228,81	84	414,720	33637	29,71
32	34,244	3263	206,60	85	433,710	34916	28,65
33	36 188	3453	211,11	86	449,760	36357	27,60
34	38 254	3619	178,66	87	467,350	37990	26,60
35	40 423	3809	163,22	88	486,090	39693	25,65
36	42,718	4017	149,77	89	505,500	40947	24,76
37	45,034	4219	137,09	90	525,280	41694	23,87
38	47 579	4432	125,63	91	545,800	43505	23,01
39	50 149	4669	114,29	92	566,950	44964	22,24
40	52,999	4919	103,53	93	588,740	46938	21,58
41	55,773	5181	93,06	94	611,180	48701	20,78
42	58,792	5418	84,59	95	634,370	49864	20,00
43	61 934	5691	77,17	96	658,040	51613	19,36
44	65 917	6025	70,60	97	682,300	53388	18,73
45	68,714	6171	68,58	98	707,650	55191	18,12
46	72,283	6343	65,83	99	733,960	57035	17,51
47	75,204	6510	63,72	100	760,000	58933	16,96
48	80 193	7152	138,09				

DEUXIÈME TABLEAU.

Densité et volume de la vapeur d'eau au maximum de tension, en prenant pour unités la densité et le volume de l'eau liquide à 0 :

Depuis 1 à 24 atmosphères d'après l'observation, Et depuis 24 à 50 d'après la formule empirique.

Température.		Densité.	Volume.	Température.		Densité.	Volume.
deg.	min.			deg.	min.		
100	1	0,00054055	1698	193,7	15	0,00010794	163,74
112	2	0,00083463	1167,9	197,19	16	0,00053700	153,10
171,3	0	0,0011117	807,09	200,48	18	0,00064444	144,00
178,8	0	0,0015673	731,39	205,60	19	0,0012366	135,90
185,1	0	0,0018130	619,16	206,57	17	0,0017392	128,71
190,8	0	0,0018486	557,96	209,4	18	0,0018774	122,38
197,5	0	0,0019997	479,19	212,1	19	0,0018831	118,53
199,06	4 1/2	0,0020530	427,18	214,7	20	0,0019863	111,28
199,06	5	0,0020763	388,19	217,3	21	0,0019566	106,55
199,08	6 1/2	0,0020909	365,99	218,9	22	0,0019853	102,185
199,2	6	0,00209402	378,85	221,6	23	0,010182	98,213
199,26	6 1/2	0,0021683	365,59	223,2	24	0,010172	94,562
199,5	6	0,0023911	296,12	226,7	25	0,010998	91,17
199,37	7 1/2	0,0027117	266,82	234,2	30	0,017903	77,30
172,1	8	0,0030335	253,59	244,63	35	0,015663	68,108
177,1	8	0,0032866	227,98	252,65	40	0,016664	60,08
181,9	10	0,0034216	207,56	259,52	45	0,018197	53,065
186,09	11	0,0035357	190,27	265,89	50	0,019306	48,215
199,0	12	0,0036633	175,96				

TROISIÈME TABLEAU.

Densité et volume de la vapeur d'eau au maximum de tension, en prenant pour unités la densité et le volume de l'eau à 0.

Depuis cent à mille atmosphères d'après la formule empirique.

Température.		Densité.	Volume.	Température.		Densité.	Volume.
deg.	min.			deg.	min.		
341,36	100	0,07417	39,72	662,71	600	0,17791	3,821
363,58	200	0,14863	14,370	678,65	700	0,30181	3,321
387,63	300	0,20937	10,358	697,52	800	0,4276	2,982
413,37	400	0,25333	7,938	705,16	900	0,572	3,065
441,70	500	0,31201	6,578	719,76	1000	0,779	3,972

Densité des vapeurs de divers liquides. (Voyez le tableau de densités, page 111.)

Les densités des vapeurs de tous les liquides ne peuvent pas être déterminées par le procédé qui nous a servi pour la vapeur d'eau; mais l'on doit à M. Dumas un autre procédé dont il s'est servi avec succès dans l'important travail qu'il a publié sur ce sujet (*Ann. de physique et de chimie*, t. 33, page 337). M. Dumas prend un ballon à col effilé; il y met une quantité suffisante du liquide qu'il veut soumettre à l'expérience, puis il chauffe ce ballon dans un bain d'eau, d'acide sulfurique ou d'alliage fusible. Quand le liquide commence à en-

trer en ébullition, l'on modère la température et l'on chauffe aussi également qu'il soit possible toute la surface du ballon et même son col effilé. L'ébullition terminée, on chauffe encore avec les mêmes précautions jusqu'à une température un peu plus élevée; alors on note cette température avec soin, on observe le baromètre, et d'un trait de chalumeau on scelle la pointe effilée du ballon. Il reste ensuite à faire trois pesées, 1°. le ballon avec la vapeur qu'il contient; 2°. le ballon plein d'eau; 3°. le ballon plein d'air sec. De la seconde on déduit la capacité, de la troisième le poids du verre, et enfin de la première le poids de la vapeur. C'est par ce moyen que M. Dumas a obtenu les nombres contenus dans le tableau de la page 111.

Au maximum de tension les vapeurs de tous les liquides connus augmentent de densité à mesure que la température s'élève. D'où il suit, que tout le liquide pent, à une température plus ou moins haute, disparaître complètement dans un espace un peu plus grand que celui qu'il occupe. C'est ainsi ce que M. Cagniard de La Tour a fait voir pour l'alcool, l'éther et le sulfure de carbone. Il a de plus observé la température à laquelle se produit le phénomène, et mesuré la tension qu'exerce alors la vapeur. Pour cela, il faisait ses expériences dans un tube recourbé, semblable à peu près à un baromètre à siphon. La courte branche avait 4 à 5 millimètres de diamètre; elle contenait le liquide; et la plus longue, 1 millimètre seulement; elle contenait de l'air. Mais le liquide et l'air étaient séparés par du mercure qu'on avait d'avance versé dans la courbure quand les deux branches étaient ouvertes; le mercure refondu par la pression pouvait remplir toute la longueur du tube à air. Les deux branches étant scellées, la colonne d'air du plus ou plus réduite faisait l'office de manomètre, pour marquer la tension de la vapeur; quant à sa température, elle était donnée par celle du bain d'huile fixe, dans lequel on plongeait l'extrémité inférieure de l'appareil et toute la longueur de la courte branche.

L'instant de la disparition et de la réduction complète en vapeur arrive dans les circonstances et aux conditions suivantes :

	Température de disposition.	Volume de la vapeur par rapport au volume de liquide.	Tension de la vapeur en nombre d'atmosphères.
Alcool (à 36° Beaumé).	259°.	3.	119—
Ether.	200°.	2.	37
Sulfure de carbone.	376°.	2.	78

233. *Condensation des vapeurs, et liquéfaction des gaz.* — Les vapeurs se condensent par compression et par refroidissement. Lorsque la vapeur sature l'espace qu'elle occupe, il suffit d'exercer sur elle une pression un peu supérieure à sa tension maximum, ou d'abaisser un peu sa température, pour qu'à l'instant elle se liquéfie dans une cer-

taine proportion. Mais quand elle ne sature plus l'espace, elle se laisse comprimer comme les gaz, et refroidir comme eux. Cette identité parfaite, entre les propriétés caractéristiques des gaz et celles des vapeurs, avait fait supposer depuis long-temps que les gaz appelés *permanens* pourraient bien n'être que des vapeurs plus ou moins éloignées de leur maximum de tension. Plusieurs expériences avaient été tentées dans cette vue, par divers moyens, mais toujours sans succès, soit à cause de la difficulté qu'on éprouve à produire de grandes pressions, soit à cause de la chaleur qui se dégage lorsqu'on les produit subitement. Enfin, par un procédé plus sûr et plus ingénieux, sir H. Davy et M. Faraday sont parvenus à liquéfier plusieurs des fluides élastiques que l'on appelait gaz permanens. Ce procédé consiste à enfermer, dans un tube de verre très fort, un réactif et une substance solide qui dégage, par la réaction chimique, le gaz que l'on veut soumettre à l'épreuve. Ainsi, c'est le gaz qui se comprime lui-même à mesure qu'il se dégage en plus grande abondance, et de cette manière on peut produire aisément des pressions de 40 ou 50 atmosphères. De plus, on peut refroidir l'une des extrémités du tube, pour ajouter le refroidissement à la compression.

Le tableau suivant contient dans la première colonne, les noms des gaz liquéfiés; dans la deuxième, les diverses températures auxquelles les liquides ont été soumis; et dans la troisième, les tensions correspondantes exprimées en atmosphères. Ces tensions ne peuvent être considérées que comme des premières approximations que des expériences plus précises devront sans doute modifier.

Tableau de la liquéfaction des gaz.

NOM DES GAZ LIQUÉFIÉS.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades.	TENSIONS des liquides exprimées en atmosphères.
Acide sulfurique.	+ 7	2
Cyanogène.	+ 7	3,6
Chlore.	+ 15,5	4
Ammoniac.	0	5
Idem.	+ 10	6,5
Hydrogène sulfuré.	— 16	14
Idem.	+ 10	17
Acide muriatique.	— 16	20
Idem.	— 4	25
Idem.	+ 10	40
Acide carbonique.	— 11	20
Idem.	0	36
Oxide nitreux.	0	44
Idem.	+ 7	51

Les autres gaz ont été soumis à des expériences analogues, sans qu'on ait pu jusqu'à présent parvenir à les liquéfier.

Cependant il n'y a aucun doute qu'ils ne puissent, par leur nature, prendre aussi l'état liquide. Dans

les nouveaux essais que l'on pourra tenter sur ce sujet, on se donnera des chances de succès, en produisant des froids de plus en plus vifs. Car tout

annonce qu'une différence d'un seul degré de chaleur peut produire des différences de tension de plusieurs atmosphères.

CHAPITRE III.

DES VAPEURS MÉLANGÉES AVEC LES GAZ.

234. Les liquides qui ne se combinent pas chimiquement peuvent bien être mêlés pendant quelques instants, mais ils se séparent peu à peu et se dégagent l'un de l'autre pour se superposer dans l'ordre de leurs densités, comme l'huile se superpose sur l'eau. Si les gaz et les vapeurs avaient des propriétés pareilles, tout serait changé sur la terre : on verrait, par exemple, les vapeurs qui se forment à la surface des eaux s'élever comme des ballons, en vertu de leur légèreté spécifique, et, poussées de la sorte jusqu'aux dernières couches de l'atmosphère, elles en sortiraient par leur élasticité pour se répandre de toutes parts dans le vide. L'évaporation étant continuelle, cette ascension se renouvellerait sans cesse ; à la fin, les lacs et les bassins des mers seraient à sec, et toutes les eaux de la terre seraient suspendues au-dessus de l'atmosphère. Il est donc visible que les fluides élastiques, dans leurs mélanges, n'obéissent pas, comme les liquides, aux lois de la densité. Cette vérité fondamentale a été mise hors de doute par une expérience directe. Berthollet avait fait descendre dans les caves de l'Observatoire deux ballons séparés par un robinet, l'un était plein d'hydrogène et l'autre d'acide carbonique, à la même pression ; après les avoir disposés, l'hydrogène en haut et l'acide carbonique en bas, on attendit long-temps avant de tourner le robinet pour établir la communication. Les deux gaz étaient certainement à la même température, dans le repos le plus absolu et à l'abri de toute agitation ; cependant le mélange se fit assez promptement : la moitié de l'hydrogène, malgré sa légèreté, descendit dans le ballon inférieur, et la moitié de l'acide carbonique, malgré sa densité, s'éleva dans le ballon supérieur. Ainsi, chacun des gaz pénétra l'autre et s'étendit, par sa force expansive, pour occuper tout l'espace qui lui était offert ; en doublant de volume, chacun prit une élasticité moitié ; mais l'élasticité totale resta la même, c'est-à-dire égale à la somme des élasticités partielles. Ce qui arrive pour deux gaz mélangés arrive pour un plus grand nombre, et le principe général du mélange des fluides élastiques est le suivant : *Lorsqu'on accumule dans le même espace divers fluides élastiques, qui sont sans action chimique, chacun se répand dans toute l'étendue de*

cet espace, et l'élasticité du mélange est égale à la somme des élasticités que prendrait chacun des fluides s'il était seul. Cette vérité peut être constatée pour les vapeurs, au moyen de l'appareil suivant. τ (Fig. 202) est un tube large et gradué, portant à chaque extrémité un robinet en fer, le robinet supérieur x n'est pas percé de part en part, il est seulement *croussé*, et s'appelle, pour cette raison, *robinet à capsule*. À sa partie inférieure, le tube τ communique au tube t , qui est plus long et plus étroit, l'on peut enlever le robinet supérieur pour faire passer dans l'appareil un courant d'air sec ; alors on remet le robinet, on verse du mercure par la branche ouverte, on incline plus ou moins pour faire sortir l'air excédant, et l'on arrive aisément à avoir, dans le grand tube τ , de l'air sec, qui se trouve sous la pression atmosphérique. Ensuite on met un liquide au-dessus du robinet à capsule, l'on tourne ce robinet toujours dans le même sens, pour faire tomber le liquide goutte à goutte, et l'on observe les phénomènes suivans. On voit le mercure baisser peu à peu, et, en même temps, on voit la couche liquide diminuer d'épaisseur ; donc la vapeur se forme dans l'air et elle se forme lentement ; ce qu'on pourrait conclure aussi des évaporations qui se font librement dans l'atmosphère. Mais, ce qui est curieux à observer, c'est que cette vapeur a un maximum de tension, et un maximum qui est dans l'air exactement le même que dans le vide. En effet, si l'on verse du mercure par la branche ouverte, pour ramener le mélange gazeux à son volume primitif, on voit que sa force élastique est plus grande qu'elle n'était d'abord, d'une quantité qui est précisément égale à la tension maximum de la vapeur, pour la température où l'on opère. On arrive encore à la même conclusion, lorsqu'on fait passer le mélange d'air et de vapeur à des pressions plus fortes, en versant une nouvelle quantité de mercure par la petite branche, ou, lorsqu'on le fait passer à des pressions plus faibles en ouvrant le robinet, pour laisser sortir du mercure. Dans tous les cas, en tenant compte des variations de volume que l'air éprouve, on voit que, constamment, la force élastique du mélange est la somme des forces élastiques de l'air et de la vapeur.

La vapeur, mélangée avec un autre fluide élastique, se condense, par deux causes, comme la vapeur isolée dans le vide ; savoir, par un excès de pression ou par un abaissement de température. Ainsi, l'air atmosphérique étant toujours humide, surtout dans les basses régions qui avoisinent la terre, si l'on prend, par exemple, un litre d'air à la température de 20°, sous la pression ordinaire de 760 millimètres, et que la vapeur, pour sa part, supporte 10 millimètres de cette pression, l'espace ne sera pas saturé d'humidité, mais en comprimant ce mélange gazeux, on augmentera la tension de la vapeur aussi bien que celle de l'air, et on les augmentera proportionnellement jusqu'à ce que la vapeur atteigne sa tension maximum ; alors, si on exerce une compression plus grande, la vapeur sera condensée en partie et se déposera sous forme de rosée sur les parois du vase. De même, en reproduisant le même litre d'air, si on le refroidissait au lieu de le comprimer, on verrait encore la vapeur se condenser, et au même degré de refroidissement que si elle était seule et sans mélange d'aucun gaz. En généralisant ces conséquences, on voit que, dans un espace donné, dans un litre, par exemple, on peut renfermer autant de substances gazeuses que l'on voudra, sans que ces substances se gênent l'une l'autre ; il faudra seulement exercer une pression égale à la somme des pressions que chacune d'elles peut supporter. Et si un tel mélange était soumis à des pressions croissantes ou à des degrés de froid de plus en plus intenses, il présenterait des phénomènes curieux par la liquéfaction successive de divers éléments, qui s'arrangeraient ensuite suivant l'ordre de leur densité.

Les mélanges gazeux présentent une question théorique très importante, c'est la question de savoir si les molécules de diverses natures exercent une pression l'une sur l'autre ; si, par exemple, les molécules d'air pressent les molécules de vapeur d'eau, et réciproquement. Tout semble indiquer qu'il n'y a de réaction mutuelle qu'entre les molécules de même espèce ; cependant nous verrons, en étudiant la propagation du son dans les mélanges de cette nature, qu'il y a une communication uniforme du mouvement vibratoire, qui suppose une

action à distance entre toutes les molécules sans distinction.

Pour compléter ces notions générales, nous indiquerons plusieurs problèmes qui peuvent se présenter dans la pratique.

1°. Étant donné un vase *inextensible*, contenant un volume v de gaz, qui exerce une pression r contre les parois, on demande quelle pression il exercera si l'on y fait passer un liquide dont la vapeur sature l'espace avec une tension maximum représentée par r .

La pression deviendra évidemment $r + r$.

2°. Étant donné un vase indéfiniment *extensible*, contenant un volume v de gaz, sous une pression p , déterminer le volume qu'il prendra si l'on y fait passer un liquide dont la vapeur sature l'espace avec une tension maximum représentée par f . On suppose que ni la pression extérieure p , ni la température ne changent pendant cette expérience.

A mesure que la pression intérieure augmente par la formation de la vapeur, elle diminue par l'expansion du gaz ; et comme elle doit, pour l'équilibre, rester égale à la pression extérieure p , il faudra, puisque la vapeur supporte f pour sa part, que le gaz supporte $p - f$; donc le volume v s'accroîtra au point de devenir $\frac{vp}{p-f}$.

3°. Un mélange gazeux a une force élastique p à la température t ; il prend une force élastique p à la température t' , sans que son volume change sensiblement ; on demande s'il s'est formé des vapeurs ou s'il s'en est précipité, et quel est le point d'ébullition du liquide qui a donné naissance à ces vapeurs, s'il y en a.

S'il n'y avait aucune vapeur de développée ou de condensée, la pression deviendrait $p \frac{(1+at')}{1+at}$, ainsi, $p' - p \frac{(1+at')}{1+at}$ sera la force élastique de la vapeur perdue ou gagnée.

Supposant que la vapeur est au maximum de tension et voyant quelle est sa force élastique entre les températures t et t' , on peut, d'après la loi de Dalton, trouver son point d'ébullition.

CHAPITRE IV.

DE L'ÉBULLITION ET DE L'ÉVAPORATION.

335. La transformation des liquides en fluide élastique s'appelle en général *évaporation*. Les liquides se vaporisent par *ébullition*, c'est-à-dire quand les vapeurs se forment au sein de la masse ;

et par *évaporation*, c'est-à-dire quand elles se forment à la surface.

336. Lorsqu'on observe l'ébullition d'un liquide, on ne voit en général qu'un mouvement plus ou

moins rapide qui agit toutes les parties de la masse, et qui les agit dans tous les sens; mais quand on excite l'ébullition dans un vase de verre, on aperçoit la cause toujours échangée qui produit les mouvements. On reconnaît que des bulles de vapeur se forment sur les parois échauffées du vase, qu'elles s'élèvent en vertu de leur légèreté, et qu'elles viennent éclater à la surface; elles sont d'abord petites au moment où elles se forment, mais elles prennent du volume à mesure qu'elles s'élèvent, et celles qui portent des points du vase les plus chauds sont celles qui se succèdent avec le plus de rapidité. Pour que ces bulles puissent se former et s'élever au milieu de la masse liquide qui les presse de toutes parts, il faut évidemment que la vapeur dont elles se composent ait une tension égale à la pression environnante; et c'est là ce qui détermine les points d'ébullition des différents liquides et aussi les points d'ébullition du même liquide soumis à des pressions différentes. Ainsi la première condition de l'ébullition est que la température soit assez haute pour que la force élastique de la vapeur puisse vaincre toutes les pressions qui se font sentir dans la masse liquide. La seconde condition, comme nous l'avons déjà vu (145), est que la vapeur trouve à absorber le calorique latent, qui est nécessaire à sa formation.

De la première condition il résulte que tout ce qui fait varier la pression du liquide ou la tension de la vapeur, fait changer aussi le point d'ébullition; et il résulte de la seconde que la rapidité de l'ébullition dépend seulement de la quantité de chaleur qui est fournie aux parois extérieures du vase dans un temps donné, et qui peut passer de là aux parois intérieures, et ensuite à la portion du liquide qui se vaporise. Ces deux conséquences exigent quelques développemens.

237. *Du point d'ébullition.* — Les causes qui peuvent faire varier le point d'ébullition d'un même liquide sont : 1° la pression qui s'exerce à sa surface; 2° sa cohésion; 3° la nature du vase qui le contient; 4° la profondeur de sa masse; 5° les substances qu'il peut tenir en dissolution.

Au niveau de la mer, sous la pression ordinaire de 760^{mm}, l'eau bout à 100°; au sommet du Mont-Blanc, dont la hauteur est de 4775 mètres, et où la pression atmosphérique est d'environ 417^{mm}, l'eau doit entrer en ébullition à la température pour laquelle la tension est 417^{mm}, c'est-à-dire à 84° environ. Si l'on pouvait s'élever plus haut, la pression devenant moindre, l'ébullition se ferait à une température encore plus basse. En général, connaissant le tableau de la tension de la vapeur d'un liquide, son point d'ébullition sous une pression donnée sera facile à trouver, puisqu'il sera toujours le degré de chaleur qui donne à la vapeur une tension maximum capable de vaincre cette pression. Réciproquement on pourra faire bouillir un liquide à une température donnée, puisqu'il

suffira toujours de diminuer la pression au point qu'elle soit moindre que la tension du liquide pour cette température.

Par exemple, sous une pression de 30^{mm}, l'eau doit bouillir à 30°, puisque à cette température la tension de l'eau est un peu plus grande que 30^{mm}; sous une pression de 10^{mm} l'eau doit bouillir à 11°, et sous une pression de 5^{mm} l'eau doit bouillir à 0°. Ces conséquences se vérifient facilement de la manière suivante : on met de l'eau à 30°, dans un vase en verre sous le récipient de la machine pneumatique, et après quelques coups de piston, quand l'éprouvette ne marque plus que 30^{mm} de tension, l'ébullition commence avec une grande force, comme si l'eau étoit sur un feu très vif, et soumise à la pression de l'air. Cette ébullition cesse bientôt, parce que la vapeur remplit le récipient et presse la surface liquide, mais par de nouveaux coups de piston, on enlève la vapeur comprimante, et on fait recommencer l'ébullition. Avec nos machines ordinaires il serait impossible de faire bouillir de l'eau à 0, puisqu'il serait impossible de maintenir le vide à 5^{mm}, à cause de la vapeur qui s'exhale sans cesse de la surface du liquide.

L'appareil qui est représenté Fig. 245 montre ces phénomènes d'une manière encore plus frappante. C'est un ballon à long col B, fermé par un bouchon b. Ce ballon est à moitié plein d'eau; on le met en pleine ébullition; et quand tout l'air est chassé on met le bouchon b; ensuite on le retourne dans la position que représente la figure. Lorsqu'il est à la température ambiante, on n'observe pas la moindre trace d'ébullition, et cela est tout simple; mais si l'on verse à la partie supérieure, de l'eau plus refroidie, alors l'ébullition se manifeste à l'instant avec beaucoup de force. L'eau froide fait bouillir l'eau du ballon, parce qu'elle condense la vapeur et diminue la pression qui s'exerceait sur le liquide. On peut même se donner ainsi le spectacle d'une ébullition sans feu qui dure des heures entières; il suffit pour cela de faire échauffer l'eau du ballon à 100° ou à peu près, le refroidissement naturel qui se fait à la partie supérieure opère dans la vapeur une assez grande condensation pour déterminer l'ébullition.

La variation du point d'ébullition a aussi été vérifiée par des expériences directes sur les lieux élevés, dans les Alpes, dans les Pyrénées et sur d'autres montagnes.

L'eau bouillante n'est donc pas également chaude dans tous les lieux de la terre, et par conséquent elle n'est pas également propre aux usages domestiques et à la préparation des alimens. A Quito, par exemple, l'eau bout à 90°, et cette température est beaucoup trop basse pour cuire beaucoup de substances qui peuvent être cuites à 100°. Le tableau suivant contient des points d'ébullition de l'eau dans plusieurs lieux habités, dont les hauteurs sont bien connues.

NOMS DES LIEUX.		HAUTEUR en mètres.	HAUTEUR en toises.	HAUTEUR en fathoms.	HAUTEUR en toises.	HAUTEUR en fathoms.	HAUTEUR en toises.	HAUTEUR en fathoms.
Métairie d'Andriana.	4101	454	66,3					
Ville de Micapampa (Perou).	5918	583	87,9					
Ville de Quito.	2108	227	30,1					
Ville de Cuzco (Perou).	2650	351	50,5					
Santa-Fé de Bogota.	2661	353	50,9					
Ville de Cuenca (provincie de Quilo).	2633	356	51,0					
Mexico.	2777	372	52,3					
Roeppe de Saint-Gobard.	2075	386	52,9					
Village de Neuf-Vers (Alpes-Marit.)	2040	388	53,1					
Village de Bonet (vallee du Mont-Cervin)	2087	391	53,6					
Village de Maurin (Basses-Alpes).	1862	392	53,7					
Village de Saint-Remi.	1693	401	54,5					
Village de Huez (Pyrénées).	1163	432	60,9					
Village de Gavarnis (Pyrénées).	1153	434	60,5					
Bismou.	1306	615	95,0					
Village de Berdige (Pyrénées).	1269	618	95,8					
Palais de Salnte-Hélène (Espagne).	1153	637	96,0					
Palais du Mont-Oir (Auvergne).	1040	667	96,5					
Pontarlier.	838	683	97,4					
Mosby.	605	709	97,8					
Isopru.	566	708	98,0					
Launich.	538	710	98,1					
Louvenne.	507	715	98,6					
Aspachbourg.	470	716	98,7					
Neuhärdli.	452	718	98,4					
Neuhärdli.	438	719	98,5					
Pontarlier.	421	721	98,9					
Château-Frédéric (piedmont).	411	722	98,8					
Gendry et Freyberg.	372	725	98,6					
Ulm.	369	726	98,7					
Estabouenne.	362	726	98,7					
Moscou.	300	732	99,0					
Gorka.	285	733	99,0					
Turin.	250	738	99,1					
Dijon.	217	740	99,2					
Prague.	178	743	99,5					
Moscou (Sud).	166	744	99,6					
Lyon (Rhône).	162	745	99,4					
Camel.	138	745	99,4					
Gendry.	134	747	99,5					
Moscou.	133	747	99,5					
Moscou (Jardin botanique).	118	748	99,6					
Bolesno.	111	749	99,7					
Parne.	83	751	99,6					
Dreder.	80	752	99,6					
Pole (Observatoire royal, 1 ^{er} étage).	63	754	99,7					
Bolesno (Capitole).	46	756	99,8					
Berlin.	40	756	99,8					

Dans un même lieu le baromètre éprouvant des variations continuelles, il en résulte que le point d'ébullition change à chaque instant. Pour Paris les hauteurs extrêmes du baromètre observées depuis dix ans ayant été 719^{mm} et 781^{mm}, on voit que le plus haut degré d'ébullition, correspondant à 781^{mm} a été d'environ 100°,8, et le plus bas, correspondant à 719, d'environ 98°,5. Il est facile de voir comment on doit tenir compte de la hauteur du baromètre au moment où l'on marque le point d'ébullition sur l'échelle d'un thermomètre.

Le révérend F. J. H. Wollaston a construit un thermomètre très sensible, marquant seulement les degrés qui avoisinent le point d'ébullition, et au moyen duquel on peut constater la différence de température entre l'eau qui bout à un étage et celle qui bout à l'étage supérieur. La construction de ce thermomètre exige beaucoup de précautions ; mais ce qu'il y a d'essentiel, c'est que chaque degré y occupe une longueur de trente millimètres au moins.

Lorsqu'on augmente la pression au lieu de la diminuer, on retarde l'ébullition, et on peut la retarder indéfiniment en augmentant indéfiniment la pression. C'est ainsi que dans l'appareil si connu sous le nom de *marmite à Popin* ou de *digesteur de Popin*, on peut élever l'eau jusqu'àux plus hautes températures sans la faire bouillir. Cet appareil n'est autre chose qu'un vase cylindrique en bronze ou en fer, dont les parois sont capables d'une grande résistance. L'ouverture en est petite, et on la ferme avec une soupape sur laquelle on met des poids de manière à produire une pression de quarante ou cinquante atmosphères suivant la force des parois. L'ébullition est impossible, puisque la vapeur qui se forme au-dessus du liquide exerce une pression toujours suffisante pour l'empêcher; mais lorsqu'on ouvre la soupape l'eau s'élève en vapeur avec une telle impétuosité qu'elle forme un jet de vingt ou trente pieds de hauteur: en même temps le vase est fort refroidi à cause de la chaleur qu'il a dû fournir à l'eau pour sa vaporisation.

Le digesteur fut inventé par Papin, vers le milieu du dix-septième siècle; il servit alors à une foule d'expériences curieuses, soit pour montrer la puissance mécanique de la vapeur, soit pour montrer la puissance dissolvante de l'eau, maintenant liquide à des températures plus hautes que 100°. Ce ne fut pas sans un grand étonnement que l'on vit alors la possibilité d'extraire des os une substance nutritive aussi bonne et presque aussi abondante que celle qui se tire des parties musculaires les plus succulentes.

L'autoclave est un appareil de même genre que le digesteur de Papin; il en diffère seulement par une ingénieuse modification. Outre l'ouverture de la soupape, qui est toujours très petite, l'autoclave porte une autre ouverture, de grandeur arbitraire et de forme essentiellement *elliptique*; par l'avantage de cette forme, le couvercle, quoique plus large, peut être mis en dedans; alors c'est la tension de la vapeur qui le presse contre les parois; ainsi l'appareil se ferme de lui-même, et se ferme d'autant mieux que la tension est plus forte.

Si l'eau n'est pas hermétiquement enfermée dans une chaudière, et s'il se trouve quelque issue par où la vapeur puisse s'échapper, le point d'ébullition dépend alors de la grandeur de l'ouverture, comparée à la surface de l'eau qui reçoit l'action du feu. Voici un tableau des températures approchées que peut prendre l'eau dans ces circonstances sous la pression ordinaire :

Température que prend l'eau dans le chauffe-eau.	Rapport de la surface de l'orifice à la surface de l'eau qui reçoit le feu.
100°	1/1000 et au-dessus.
105	1/5000
115	1/10000
135	1/20000

Il paraît que, dans le même temps, la quantité

de vapeur qui sort par chacune de ces ouvertures est à peu près la même. Ainsi, en l', le poids d'eau vaporisée qui s'élève d'une chaudière tout-à-fait ouverte à 100° de température, serait à peu près le même que le poids d'eau vaporisée qui jaillirait de la même chaudière à 138°, par une ouverture dont la surface serait 1/20000 de celle de l'eau qui reçoit le feu.

2°. La cohésion du liquide peut avoir une influence pour modifier ce principe, qu'à la température de l'ébullition la force élastique de la vapeur est égale à la pression de l'air. En effet, les petites bulles de vapeur ne pouvant se former sans écarter les molécules qui les environnent, on conçoit qu'à leur naissance elles ont à rompre la cohésion du liquide et à vaincre la pression extérieure. Or, si la cohésion est une résistance sensible, il faudra que la force élastique de la vapeur soit capable de l'emporter sur ces deux forces réunies, c'est-à-dire qu'elle soit plus grande que la pression, de toute la force qui résulte de la cohésion. Mais les bulles une fois formées, l'effet de la cohésion devient moindre, et la vapeur éprouve une sorte de détente qui augmente brusquement son volume. Ainsi, par cette cause, l'ébullition est retardée, et de plus elle est forcée de se faire par *soubresauts* et par mouvements saccadés.

3°. La nature du vase a une influence sur le point d'ébullition. M. Gay-Lussac a observé que l'eau, par exemple, bout plus tard dans le verre que dans le métal, et il en attribue la cause à l'action moléculaire qui s'exerce alors entre le solide et le liquide, action qui est toute pareille à la cohésion, et qui produit des résultats analogues. Une tige métallique plongée dans le liquide, ou du métal en poudre jeté au fond d'un vase en verre suffisent pour ramener le point d'ébullition à ce qu'il serait dans un vase en métal. Cette précaution remédie aussi à un autre inconvénient : elle empêche les secousses et les *soubresauts*, qui projettent le liquide et qui souvent même font éclater le vase.

4°. Dans une masse liquide très profonde, outre la pression qui s'exerce à la surface, les molécules du fond supportent encore toute la pression due à la colonne liquide supérieure. Ainsi, dans une chaudière pleine d'eau, de treute-deux pieds de profondeur, les couches du fond supportent deux atmosphères, et par conséquent, les bulles de vapeur ne peuvent s'y former, à moins que la température ne soit de 121° ; c'est donc là le point d'ébullition de l'eau pour cette profondeur. Mais les couches superficielles ne pouvant être qu'à 100°, il arrive que les couches du fond s'élèvent sans cesse, à cause de leur dilatation ; qu'elles forment des bulles de vapeur à cause de l'abaissement de la pression, et, par conséquent, qu'elles se refroidissent, et passent successivement par toutes les températures, depuis 121° jusqu'à 100°. Dans les vases qui n'ont même que quelques pouces de pro-

fondeur, il se produit un phénomène analogue, avant que l'ébullition ne commence. Les couches du fond prennent au parois du vase assez de chaleur pour se vaporiser, de petites bulles se forment et s'élèvent, mais en gagnant les couches supérieures qui sont encore trop froides, elles se condensent subitement. De là ce bruit singulier qui précède de quelques instants l'ébullition des liquides. On s'en assure aisément en faisant l'expérience dans des ballons de verre, car on voit les bulles se former, s'élever un peu, et disparaître tout-à-fait.

5°. Le point d'ébullition d'un liquide n'est pas échangé par les corps étrangers qui sont mécaniquement suspendus dans sa masse, comme les parcelles de sable dans l'eau ; mais il est toujours échangé par les corps qui sont chimiquement combinés avec sa substance. Tous les sels solubles, par exemple, retardent le point d'ébullition de l'eau ; et un phénomène digne de remarque, c'est que la vapeur que donnent ces dissolutions est de la vapeur d'eau parfaitement pure, sans aucune trace des substances dissoutes. Voici les points d'ébullition de quelques dissolutions saturées.

Sel ordinaire.	106,9
Muriate d'ammoniaque. . .	114,4
Nitre.	115,6
Tartrate de potasse. . . .	116,7
Nitrate d'ammoniaque. . .	125,3
Sous-carbonate de potasse. .	140,0

Ainsi, dans la dissolution de sel ordinaire, par exemple, la vapeur qui se forme pendant l'ébullition est à la température de 106°,9, et sous la pression de 760 ; c'est-à-dire que sa tension n'est pas au maximum, ou plutôt sa tension est un maximum dépendant de son contact avec la dissolution et moindre que le maximum absolu. Il résulte de là une propriété qui est souvent utile dans les arts, c'est qu'avec de la vapeur d'eau à 100° on peut produire une température beaucoup plus haute que 100° ; car, si l'on fait arriver un courant de vapeur d'eau dans une dissolution de sous-carbonate de potasse à 100°, la vapeur y sera condensée et y déposera son calorique latent, jusqu'à ce que la température de la dissolution arrive à 140°, puisqu'à ce terme seulement la force élastique de la vapeur qui arrive pourra être balancée et arrêtée par la force élastique de la vapeur qui se dégage.

Lorsqu'un liquide est combiné avec un autre liquide plus ou moins volatil que lui, il y a encore changement dans le point d'ébullition ; mais alors la vapeur qui se forme est un mélange en diverses proportions des vapeurs des deux liquides. Ainsi, l'alcool avance le point d'ébullition de l'eau ; l'acide sulfurique le retarde, et dans les deux cas, les vapeurs sont simplement mélangées, quoique les liquides soient chimiquement combinés.

237. *De la rapidité de l'ébullition.* — La quantité de vapeur qui se forme par ébullition dépend de la

quantité de ebuller qui reçoit le liquide dans un temps donné; et cette quantité de chaleur dépend : 1^o de l'activité du foyer; 2^o de la nature et de l'épaisseur des parois de la chaudière; 3^o de l'étendue de la surface liquide qui reçoit l'action du feu.

1^o. L'activité du foyer dépend de la disposition du fourneau et surtout de la nature du combustible; car le bois, le charbon, la tourbe, la houille et l'anthracite ne donnent pas, à poids égal, la même quantité de chaleur, et ils ne sont pas non plus capables de produire la même température.

2^o. La surface extérieure de la chaudière peut être plus ou moins propre à recevoir l'action du feu, et à absorber la chaleur qui la frappe, et nous verrons aussi que la nature des parois et leur épaisseur ont une influence considérable sur la quantité de chaleur qui peut les traverser dans un temps donné.

3^o. L'eau qui reçoit l'action du feu est celle qui touche les parois échauffées de la chaudière, et si chaque partie de ces parois fournit la même quantité de chaleur, il est évident que l'eau vaporisée dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la chaudière que peut frapper la flamme. C'est ce qui est en effet confirmé par quelques expériences, dont la précision est au moins suffisante pour la pratique; il paraît que dans les circonstances les plus favorables, avec un feu aussi vif qu'il soit possible, chaque centimètre carré de la surface de chauffe peut vaporiser dix grammes d'eau en une heure, ou chaque mètre carré 100 kilogrammes ou 100 litres; mais dans l'usage ordinaire, le feu étant moins vif et moins soutenu, on n'obtient guère en une heure que la moitié ou le tiers de ce résultat, c'est-à-dire environ 4 à 5 grammes par centimètre carré, ou 40 à 50 litres par mètre carré. On comprend assez combien cette donnée est importante dans les arts, puisque c'est par elle qu'on peut juger d'avance des dimensions qu'il convient de donner aux chaudières à vapeur. On saura, par exemple, que, si une chaudière doit vaporiser 500 litres d'eau par heure, il faut la disposer dans le fourneau pour que 10 mètres carrés de la surface, au moins, soient directement frappés par la flamme.

238. Table des points d'ébullition de divers liquides.

	Degrés.	
Éther sulfurique.	35,6	Gay-Lussac.
Soufre carboné.	47,0	<i>Idem.</i>
Alcool.	78,4	<i>Idem.</i>
Dissolution saturée de sulfate de soude.	100,7	<i>Idem.</i>
Dissolution d'acétate de plomb.	103	<i>Idem.</i>
Dissolution de muriate de soude.	108,9	<i>Idem.</i>
Huile de trébenthine.	157	
Phosphore.	290	

Soufre.	290
Acide sulfurique.	310
Huile de lin.	316
Mercure.	350

239. Plusieurs liquides, mis en contact avec une surface chauffée jusqu'au rouge blanc, présentent ce phénomène singulier, qu'au lieu de s'agiter et de bouillir vivement, ils se tiennent en repos et conservent leur volume, à peu près comme si la température était insuffisante pour l'ébullition. Pour en faire l'expérience sur de petites masses, on fait chauffer un creuset de verre ou de métal, et ensuite on y laisse tomber quelques gouttes d'eau; ce liquide s'arrondit alors comme le mercure sur le verre; il reste en repos pendant long-temps, ou bien il tourne sur lui-même d'un mouvement très rapide; l'ébullition est nulle et la diminution de volume insensible. Mais si l'on retire le creuset pour qu'il se refroidisse, il arrive un moment, près duquel la température du rouge brun, où tout à coup le liquide bout avec violence et se trouve projeté de toutes parts. L'eau chargée d'un alcali ou de quelques sels solubles devient incapable de produire ce phénomène; elle entre alors en ébullition dans un creuset rouge-blanc, comme dans un creuset qui est chaud, sans être rouge. Cette propriété se manifeste encore dans d'autres circonstances et sur des masses plus considérables : par exemple, une marmite à Papin assez forte pour supporter la température rouge sans explosion, pourrait alors être débouchée sans donner naissance à un jet de vapeur considérable. Ce résultat s'est présenté dans les *générateurs* de la machine à vapeur de Perkins. A la température rouge, on peut les percer du plusieurs ouvertures sans que la vapeur s'échappe, mais à une température plus basse la vaporisation s'opère et la vapeur s'élance avec une grande impétuosité. On pense en général que ce phénomène résulte d'une couche de vapeur qui se forme au contact de la surface métallique, et qui empêche la chaleur de passer du métal au liquide; car il est évident que le liquide ne s'échauffe pas assez pour bouillir. Il se pourrait bien aussi que la chaleur pût alors traverser le liquide sans l'échauffer. Quoi qu'il en soit, cette propriété est fort curieuse, et mérite de nouvelles recherches.

240. De l'évaporation. — L'évaporation est la formation de la vapeur à la surface libre des liquides, tandis que l'ébullition est, comme nous venons de la voir, la formation de la vapeur dans le sein de la masse. L'eau s'évapore à la surface des rivières, des lacs et des mers; elle s'évapore à la surface de la terre, sur le sol et sur les plantes; et il est évident qu'elle n'a pas alors une force élastique capable de vaincre la pression de l'air. Ainsi, les observations les plus communes nous font voir que la vapeur se forme sur l'eau à toutes températures, et qu'elle s'exhale dans l'air avec les plus faibles tensions. On avait d'abord présumé qu'une

effluë chimique était nécessaire entre les molécules d'air et de vapeur pour que ce phénomène pût se produire; mais nous avons vu qu'il n'est nul besoin de recourir aux forces chimiques : la vapeur, quelque faible que soit sa tension, se mélange avec l'air, comme deux gaz se mélangent entre eux. La seule condition pour qu'un liquide s'évapore est ilane que les couches d'air qui l'environnent ne soient pas saturées de vapeur; et comme il arrive, dans le mélange de deux gaz, que les molécules de l'un sont un obstacle mécanique à la diffusion des molécules de l'autre, il arrive aussi, dans l'évaporation, que l'air oppose une résistance à la diffusion de la vapeur. Ainsi, dans une atmosphère parfaitement calme, l'évaporation est lente, tandis que dans une atmosphère agitée elle devient de plus en plus rapide, à cause que les couches non saturées sont sans cesse ramenées en contact avec le liquide. Un vent sec animé d'une vitesse infinie, en soufflant sur la surface d'un lac, y produirait une évaporation aussi instantanée que celle qui se produirait dans un vide infini, car les molécules de vapeur seraient emportées si vite qu'elles ne pourraient exercer aucune pression sur les molécules d'eau, pour les empêcher de se vaporiser à leur tour.

La rapidité de l'évaporation n'est pas seulement dépendante de l'agitation de l'air; elle dépend aussi de la tension de la vapeur, ou plutôt de la différence qui existe entre la tension de la vapeur qui se forme et celle de la vapeur qui est déjà formée dans l'air. Il résulte des expériences de Dalton, sur ce sujet, que la quantité de liquide qui peut se vaporiser dans un temps donné, est toujours proportionnelle à cette différence de tension. Ainsi, dans un air parfaitement sec, à 11° de température, il se vaporiserait, à surface égale, autant d'eau à peu près qu'il s'en pourrait vaporiser à 30° dans un air humide, contenant de la vapeur à vingt millimètres de tension.

Il est à peine nécessaire de remarquer que, toutes les autres circonstances étant les mêmes, la quantité d'eau qui s'évapore dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la surface sur laquelle la vapeur prend naissance.

Les autres liquides s'évaporent à l'air libre, d'après les mêmes principes que l'eau; on peut dire seulement que pour eux, la rapidité de l'évaporation est proportionnelle à la tension de la vapeur; car, en général, quand ils se vaporisent, il n'y a pas dans l'air de vapeur préexistante qui presse la surface liquide et retarde l'évaporation.

Nous verrons, dans la Météorologie, tous les phénomènes naturels qui résultent de la formation de la vapeur, de sa suspension dans l'atmosphère et de sa condensation sous forme de pluie, de rosée, de gelée, etc.

241. *Du froid produit par la vaporisation.* — Quand un liquide est en ébullition à l'air libre, il conserve une température fixe, parce qu'il reçoit

du foyer, pas les parois du vase, autant de chaleur que la vapeur en absorbe pour se former; quand l'ébullition se fait sous le récipient de la machine pneumatique, la température s'abaisse graduellement, parce qu'alors c'est à la masse liquide et aux corps environnans que la vapeur doit prendre le calorique latent nécessaire à sa formation. Nous verrons plus loin qu'un gramme de vapeur d'eau, en se formant par ébullition ou par évaporation, absorbe une quantité de chaleur latente, capable d'élever de 1° la température de 590 grammes d'eau liquide; ainsi, on peut juger de la rapidité avec laquelle s'abaisse la température d'une masse liquide soumise à une ébullition spontanée ou à une prompte évaporation. Nous indiquerons les expériences les plus frappantes qui reposent sur ce principe.

Congélation de l'eau dans le vide. — On met sous le récipient de la machine pneumatique un large vase en verre, contenant de l'acide sulfurique; à quelques pouces au-dessus on dispose une capsule de métal très mince et très évasée, contenant quelques grammes d'eau : ordinairement cette capsule est portée par trois fils ou par trois bandes de métal très déliées, qui s'ajustent sur les bords du vase en verre. Après quelques coups de piston l'eau entre en ébullition; en continuant de faire le vide, l'ébullition cesse, et quand le vide est fait aussi complètement que possible, on attend quelques minutes; des aiguilles de glace paraissent dans la capsule, et bientôt après toute l'eau qu'elle contient ne forme plus qu'une masse solide. Cette expérience curieuse est due à Leslie. L'acide sulfurique absorbe la vapeur d'eau à mesure qu'elle se forme, et détermine ainsi une évaporation plus prompte. Tout corps puissamment absorbant produit le même effet; la farine d'avoine, un peu torréfiée, réussit parfaitement. La capsule est très mince, parce qu'elle doit participer au refroidissement, et on l'isole des corps voisins pour qu'elle n'en reçoive pas la chaleur. On a employé ce procédé avec quelques modifications, mais avec peu de succès, pour fabriquer de la glace à Londres.

Une congélation, fondée sur les mêmes principes, peut se faire plus commodément avec l'appareil de la Fig. 203. La boule supérieure est à moitié pleine d'eau, et le vide a été fait en scellant la boule inférieure *a'* pendant l'ébullition. Pour congeler l'eau qui est en *a*, il suffit de plonger la boule *s'* dans un mélange réfrigérant, ou bien de la refroidir elle-même par une autre évaporation, en l'arrosant avec un liquide très volatil.

Congélation du mercure. — On peut pousser le refroidissement par évaporation au point de congeler le mercure. Pour cela on recv d'une petite éponge ou de quelque tissu spongieux la boule d'un thermomètre et on l'humecte de carbure de soufre, ou, ce qui vaut mieux encore, d'acide sulfurique liquide; l'évaporation est si rapide et la quantité de chaleur élevée si considérable que

la colonne de mercure se précipite à — 10, — 20, — 30°, et au bout de quelques instans tout le mercure de la boule est congelé.

Le froid qui se fait sentir sur la main lorsqu'on y laisse tomber quelques gouttes d'un liquide volatil, et en général le froid qu'on observe à la surface des corps humides, sont des phénomènes résultant de la même cause.

Les *alcarrasas* dont on se sert en Espagne et ailleurs pour rafraîchir l'eau et les boissons spiritueuses, sont des vases poreux qui offrent à l'évaporation une grande surface humide. Le liquide intérieur s'infiltre à travers les parois; il s'évapore promptement dans un air un peu agité, et cette action se renouvelant sans cesse, le vase et le liquide qu'il contient sont maintenus par là à une température de 10, 15 ou 20° au-dessous de la température ambiante.

Par une raison semblable, les plantes doivent être en général à une température plus basse que

celle de l'air, car leurs tissus extérieurs font plus ou moins l'office d'*alcarrasas*.

La transpiration abondante, et l'exhalation qui se fait sans cesse à la surface des corps vivans, sont pareillement une cause de refroidissement : nous verrons plus loin, en parlant de la chaleur animale, que le sang des animaux à sang chaud a une température fixe, qui ne peut s'élever ou s'abaisser sans les plus graves inconvéniens, et qui ne peut varier de quelques degrés sans que la mort s'ensuive. Pour l'homme, quel que soit le climat qu'il habite, cette température fixe est de 37°. Ainsi, sous la zone torride, où l'air s'élève souvent à des températures de 60°, les hommes vivent dans cette atmosphère brûlante, sans participer à sa température; l'activité de la transpiration est sans cesse proportionnée à l'énergie de la chaleur, et ces causes contraires se balancent avec tant d'harmonie, que le sang d'un Nègre reste à peu près à 37°, comme le sang d'un Lapun.

TROISIÈME PARTIE.

DE LA COMMUNICATION DU CALORIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA CONDUCTIBILITÉ.

242. La *conductibilité* est la propriété dont jouissent les corps, d'absorber la chaleur et de la répandre dans leur masse. On distingue la *conductibilité extérieure* ou la *pénétrabilité*, et la *conductibilité propre* ou la *perméabilité*. Par sa *pénétrabilité*, un corps laisse le calorique passer de sa surface à la surface d'un corps contigu, *ou vice versa*; par sa *perméabilité*, il laisse le calorique passer d'un point à un autre de sa masse. Par exemple, une barre de fer étant plongée par une de ses extrémités dans un bain de plomb fondu, on sait que la chaleur gagne peu à peu sur la longueur de la barre, et qu'à la fin elle se fait sentir jusqu'à une grande distance. Or, la quantité de chaleur qui entre par une étendue donnée de la partie plongée, dépend de la *pénétrabilité*; et celle qui passe d'une section à la section suivante dépend de la *pénétrabilité* et de la *perméabilité*, car elle dépend des pertes qui se font à l'extérieur par la surface libre et de la facilité avec laquelle le calorique se propage d'une molécule du fer à la molécule suivante.

243. *Conductibilité des solides.* — Lorsqu'une barre prismatique très longue est plongée dans un bain de chaleur par une de ses extrémités, toutes ses sections, diversement éloignées du bain, prennent au-dessus de l'air ambiant des températures différentes; et quand l'équilibre est rétabli, chacune ayant la chaleur qu'elle doit conserver, on observe cette loi remarquable, que *pour des distances au bain, croissant en progression arithmétique, les excès de température décroissent en progression géométrique*. Cette loi n'a été vérifiée que pour des températures qui n'étaient pas très hautes. Pour comparer les conductibilités propres des diverses substances, on a coutume de les revêtir de quelques couches de vernis, afin de leur donner la même pénétrabilité; mais même avec ces précautions on n'atteint le but qu'imparfaitement, et sorte que les rapports de conductibilité propre auxquels on parvient ne sont que des approximations. C'est là l'idée qu'il faut attacher aux nombres contenus dans la table suivante :

Platine	981
Cuivre	898
Fer	374
Zinc	363
Étain	304
Plomb	180
Marbre	24
Porcelaine	12
Terre des fourneaux	11

Ces nombres suffisent cependant pour montrer qu'entre les différents corps il y a une prodigieuse différence de conductibilité propre. Les métaux sont de *très bons conducteurs* par rapport aux autres corps, et parmi eux l'or est le premier et le plomb le dernier; parmi les *mauvais conducteurs*, ceux qui paraissent les plus mauvais sont le verre et surtout le charbon, dont les nombres proportionnels ne sont pas rapportés dans la table.

Lorsqu'on veut simplement constater l'inégale conductibilité des différents corps, on peut se servir de l'appareil d'Inghenous. Cet appareil se compose d'une petite caisse en cuivre, sur un des côtés de laquelle on fixe perpendiculairement de petits cylindres de diverses substances de même diamètre dont chacun est recouvert d'une couche de cire. En versant dans la caisse de l'eau bouillante ou de l'huile très chaude, la chaleur pénètre dans les cylindres et fait fondre la cire qui les recouvre; pour les uns, la cire fond jusqu'à une grande distance de la caisse, ce sont les meilleurs conducteurs; pour les autres, elle ne fond qu'à quelques lignes de distance, ce sont les mauvais conducteurs.

Tous les corps réduits en filaments très fins ou en parcelles très petites sont de mauvais conducteurs; ainsi le poussier de charbon, la brique pilée, le sable, le verre en poudre, tiennent très bien la chaleur, de même que la laine, la soie, la plume, l'édredon, etc.

244. *Conductibilité des liquides.* — Les changements de densité, qui accompagnent les changements de température, produisent dans les liquides des mouvements continuels qui en mélangent toutes les parties; aussitôt que des molécules de la masse

Or	1000
Argent	973

deviennent plus denses ou plus légères, elles tombent ou elles s'élèvent, et toutes les molécules qu'elles rencontrent participent plus ou moins à leurs températures et à leurs mouvemens. Ces phénomènes intérieurs des masses liquides peuvent être rendus sensibles par l'expérience suivante : on mêle dans de l'eau des parcelles visibles, ayant à peu près la même densité qu'elle, par exemple, de la sciure de chêne ou de hûis, et ensuite on la fait échauffer ou refroidir dans une cloche à minces parois (Fig. 212). La température ambiante étant de 15 ou 20°, le refroidissement de la partie inférieure détermine des courans descendans contre les parois, et au milieu de la masse un courant ascendant; le refroidissement de la partie supérieure produirait le même effet. Au contraire, le réchauffement de la partie inférieure produit des courans ascendans contre les parois, et un courant descendant au milieu. Toute la masse participe bientôt à l'abaissement ou à l'élévation de température, et il est visible que c'est par mélange bien plus que par conductibilité. Cependant, si on échauffe la masse par le haut, les molécules réchauffées ayant la place qui convient à leur densité, nul mouvement ne se manifeste, et alors la question de la conductibilité se réduit à savoir si dans ce cas la couche supérieure seule se réchauffe, ou si la chaleur se propage de couche en couche à travers les molécules immobiles du liquide. Rumford attribuait aux liquides une non-conductibilité absolue, et pour en donner la preuve, il faisait l'expérience suivante : Après avoir fait geler de l'eau au fond d'un vase en verre *vv* (Fig. 211) de manière à avoir une petite éminence de glace *e*, il versait un liquide dans le vase, et faisait descendre à une petite distance de la pointe de glace un cylindre *c* plus ou moins chaud. La chaleur du cylindre ne pouvait arriver à la glace que par la conductibilité à travers les couches liquides, et Rumford prétendait que la glace n'éprouve pas la moindre trace de fusion. Pendant toute l'expérience, le fond du

vase *vv* doit plonger dans la glace fondante *ff*. Cependant, d'autres expériences indiquent dans les liquides une conductibilité certaine, et il faut bien qu'il en soit ainsi, car s'ils étaient absolument non-conducteurs, ils ne pourraient pas se réchauffer même par l'agitation et par le mélange de toutes les parties.

La faible conductibilité des liquides se prouve encore par une autre expérience : on perce la paroi d'un vase en verre à quelques lignes au-dessous du bord, pour y faire passer un petit thermomètre que l'on fixe horizontalement; ensuite on remplit le vase, l'on verse encore au-dessus du liquide une couche d'alcool ou d'éther, à laquelle on met le feu. Pendant toute la combustion, qui dure plusieurs minutes, le thermomètre n'est séparé de la flamme que par une couche très mince de liquide, et cependant il monte très peu, son ascension peut même en grande partie être attribuée au calorique qui se communique par les parois du vase.

245. *Conductibilité des gaz.* — Les gaz étant plus dilatables encore et plus mobiles que les liquides, on conçoit que les changemens de température, dans quelques points de leur masse, y produisent des courans plus nombreux et des mouvemens plus rapides. Ainsi, la conductibilité des gaz est encore plus difficile à observer que celle des liquides; cependant toutes les expériences s'accordent à montrer qu'elle est aussi très faible, et que la chaleur ne passe que très lentement de molécule à molécule dans les couches qui sont en repos.

Cette propriété est mise à profit dans les arts : pour conserver la chaleur dans une enceinte, ou pour l'empêcher d'y pénétrer, il suffit de faire deux enveloppes entre lesquelles on enferme hermétiquement une couche d'air d'un ou deux pouces d'épaisseur, dont on gêne les mouvemens par quelques brins de paille, ou par quelque autre substance filamenteuse.

CHAPITRE II.

DU CALORIQUE RAYONNANT.

246. *De l'existence du calorique rayonnant, et de l'idée qu'on peut se former des rayons calorifiques.* — Le calorique rayonnant est celui qui passe à travers certains corps, comme la lumière passe à travers les corps diaphanes. La chaleur solaire ne vient frapper la terre qu'après avoir traversé toute la couche atmosphérique; et si l'air s'échauffe pendant un jour serein, tout le monde sait que les

corps s'échauffent aussi, et qu'en général leur température est beaucoup plus haute que celle de l'air. Donc une partie de la chaleur du soleil traverse, comme la lumière, toute l'épaisseur de l'atmosphère sans être absorbée. De même, le feu d'un foyer nous échauffe à distance, sans que les couches d'air qui nous séparent de lui soient échauffées de proche en proche; car on s'aperçoit aisément

qu'elles restent froides et même qu'elles peuvent être agitées et rapidement renouvelées sans qu'à la même distance on en ressente un moindre effet. Un boulet rouge de feu, suspendu au milieu d'un appartement, est encore plus propre à montrer ce phénomène : de toutes parts autour de lui on reçoit une impression de chaleur, tandis que l'air environnant qui ne le touche pas conserve à peu près son état de repos et sa température primitive. Ainsi, les corps qui sont échauffés jusqu'à donner de la lumière ont en même temps la propriété d'émettre autour d'eux, dans tous les sens, du calorique qui passe à travers l'air, comme la lumière passe à travers les milieux diaphanes. C'est d'après cette analogie que l'on dit, en parlant de la chaleur, *des rayons colorifiques, des rayons de calorique ou des rayons de chaleur*, comme on dit, *des rayons lumineux ou des rayons de lumière*. Si, d'un point de la surface d'un corps chaud, ou même à l'extérieur une ligne mathématique dans une direction quelconque, la chaleur qui se propage suivant cette ligne est ce qu'on appelle un *rayon de calorique*. Ainsi, la flamme et les corps échauffés jusqu'à devenir lumineux lancent de toutes parts des rayons de chaleur, comme ils lancent des rayons de lumière.

On ne voit pas d'abord combien est remarquable cette propriété, parce qu'elle porte avec elle une sorte d'explication, toute naturelle en apparence, et qui ne manque pas de se présenter à l'esprit. C'est la lumière elle-même, peut-on dire, c'est la lumière de la flamme et des corps rouges qui se propage à distance et qui échauffe les corps qu'elle rencontre; il n'est donc pas étonnant que cette chaleur rayonnante se comporte comme la lumière. Mais l'on découvre bientôt l'insuffisance de cette explication; car la chaleur obscure est rayonnante comme la *chaleur lumineuse*. Quand le boulet de l'expérience précédente tombe par le refroidissement, du rouge blanc au rouge cerise, puis au rouge, et ensuite au rouge obscur, il ne cesse pas pour cela de donner à distance l'impression de la chaleur; enfin, quand il cesse d'être visible, même dans les ténèbres, il ne cesse pas pour cela de lancer des rayons de chaleur, de toutes parts et à de grandes distances; à défaut d'un thermomètre, on peut s'en assurer avec la main. Ces rayons, il est vrai, sont moins vifs que ceux qui viennent du même corps, tout étincelant de lumière; mais, comme eux, ils traversent l'air librement et s'en vont frapper au loin et échauffer tous les corps environnants. Le même phénomène se reproduit sans cesse autour de tous les corps, quelle que soit leur température : un vase rempli d'eau bouillante rayonne comme un boulet rouge; le corps humain, qui n'est qu'à 37°, rayonne de la même manière; la glace elle-même et les corps plus froids que la glace jouissent aussi de cette propriété fondamentale. Ainsi, tout corps, quel qu'il soit, est, par rapport à la chaleur, ce qu'est une bougie en flam-

mée, par rapport à la lumière : de tous les points de la flamme partent des rayons lumineux qui se répandent au loin dans l'espace; pareillement, de tous les points d'un corps quelconque partent des rayons de chaleur qui traversent l'air et se propagent librement, jusqu'à ce qu'ils rencontrent quelques corps qui les arrêtent.

Pour étudier le calorique rayonnant, on se sert avec avantage d'un thermomètre particulier, que l'on appelle *thermoscope* ou *thermomètre différentiel*.

247. *Thermomètre différentiel*. — Cet appareil est représenté dans la figure 200. Pour le construire, on prend un tube dont le diamètre intérieur est de deux ou trois millimètres, on souffle une boule à l'une de ses extrémités, et on le courbe à angle droit vers le quart de sa longueur, on arrondissant la courbure; ensuite on y fait passer de l'acide sulfurique, coloré en rouge avec du carmin, de manière que la boule soit à peu près au quart pleine. On prépare un second tube pareil au premier et en le prépare tout-à-fait de la même manière, à cela près qu'on n'y met point de liquide; enfin on les soude bout à bout par leur extrémité ouverte, de telle sorte que leur ensemble forme les trois côtés d'un rectangle, comme on le voit dans la figure. Cela fait et l'équilibre de température étant établi, il est évident que l'extrémité de la colonne liquide reste au même point dans le tube, quelle que soit la température commune des deux boules; ce point est le 0 de l'échelle. Mais si l'une des boules est plus chaude que l'autre, l'excès de pression de l'air qu'elle contient met la colonne liquide en mouvement et la force à marcher vers la boule la plus froide. C'est donc la différence de température seulement qui devient sensible sur cet instrument, et c'est pour cela qu'on l'appelle thermomètre différentiel. Pour le graduer, on enveloppe une des boules avec de la neige fondante, tandis qu'on maintient l'autre à une température connue, à 20° par exemple, et l'on divise en vingt parties égales l'espace qui a été parcouru par la colonne depuis le 0 jusqu'au point où elle s'arrête. Les divisions peuvent être continuées des deux côtés. Cet ingénieux appareil est dû à M. Leslie, l'un des premiers et des plus habiles expérimentateurs qui aient étudié les propriétés du calorique rayonnant. Pendant que M. Leslie, en Écosse, jetait les fondemens de cette nouvelle théorie de la chaleur, Rumford, en France, se livrait à des recherches sur le même sujet et avec le même succès. Rumford avait aussi inventé, pour ses expériences, un instrument analogue au thermomètre différentiel; c'est le *thermoscope* qui est représenté dans la figure 210. Ici la colonne liquide s, qui sert d'index, est très courte; et, pour régler l'instrument, de manière qu'un zéro elle en occupe le milieu, il y a un petit appendice n, où elle peut se loger pendant que l'équilibre de température s'établit entre les deux boules. Ensuite on la fait sortir après avoir produit avec la chaleur de la main

on excès de température dans la boule *b*, qui répond à peu près à la longueur *af*.

243. Pouvoir absorbant. — Le pouvoir absorbant est la faculté qu'ont les corps de s'approprier une partie plus ou moins grande de la chaleur rayonnante qui vient tomber sur leur surface. Tous les corps ont un pouvoir absorbant, par rapport à la chaleur solaire, car tous s'échauffent aux rayons du soleil; et ils ont des pouvoirs absorbants différents, car ils s'échauffent inégalement. Ces mêmes propriétés se reproduisent par rapport à la chaleur rayonnante obscure. Un vase un peu grand, étant rempli d'eau bouillante, si on lui présente, à quelque distance, le thermomètre différentiel, de manière que l'une des boules reçoive le rayonnement, tandis que l'autre en reste abritée par un écran, on observe dans la première un excès de température très sensible, qui est une preuve de l'absorption. Cet excès de température se manifeste, quel que soit l'état de la boule exposée au rayonnement, soit qu'elle ait sa surface vitrée naturelle, soit qu'on la revête d'une feuille d'or battu, ou d'une feuille de papier ou d'une couche de noir de fumée ou d'une autre substance quelconque. Donc toute substance a la propriété d'absorber au moins en partie le calorique rayonnant qui la frappe.

La nature des corps et l'état de leur surface ont une grande influence sur le pouvoir absorbant; car les deux boules du thermomètre différentiel étant exposées de la même manière au rayonnement, l'une ayant sa surface nue, l'autre ayant sa surface noircie ou couverte de diverses enveloppes très minces, on observe entre elles des différences de température plus ou moins marquées, suivant la nature des enveloppes qui revêtent la seconde boule. En général, les surfaces métalliques, d'or, d'argent ou d'étain, ont un pouvoir absorbant très faible et beaucoup moindre que celui de la surface nue, tandis que la surface noircie a un pouvoir absorbant plus grand.

240. Pouvoir réfléchissant. — Le pouvoir réfléchissant est la faculté qu'ont les corps de renvoyer, dans les directions déterminées, une partie plus ou moins grande des rayons de chaleur qui viennent tomber sur leur surface. Une expérience frappante met en évidence cette faculté des corps. On dispose deux miroirs paraboliques *m* et *m'* en face l'un de l'autre et à la distance de quinze ou vingt pieds (Fig. 213); au foyer du premier on met de l'amadou, de la poudre ou quelque autre substance inflammable; au foyer du second on met un boulet chauffé au rouge blanc ou des charbons allumés dont on active le feu par un courant d'air rapide. Alors, en peu d'instants, on voit l'amadou qui s'échauffe et s'enflamme. Ce n'est point la chaleur directe qui peut produire ce phénomène curieux; car à quelques ponce du boulet ou à quelques ponce du feu, l'amadou ne s'enflammerait pas. Mais les rayons calorifiques, émanés du corps chaud, par le côté qui regarde le miroir *m'*, tom-

bent sur ce miroir, se réfléchissent parallèlement à l'axe commun *xy*, traversent l'air sans s'arrêter et viennent tomber sur le second miroir *m*, où ils se réfléchissent de nouveau, en se dirigeant pour concourir tous et pour se concentrer au même point *f*, qui en est le foyer.

Cette expérience ne prouve pas seulement que la chaleur se réfléchit, mais elle prouve encore que la chaleur se réfléchit comme la lumière: car, une bougie était placée en *f'*, on observerait en *f* une image nette et brillante de la flamme; c'est même par ce moyen qu'on ajuste les miroirs et qu'on détermine les positions précises des foyers *f* et *f'*. La loi remarquable de cette réflexibilité est que l'angle de réflexion est toujours égal à l'angle d'incidence. L'angle d'incidence est celui que le rayon incident fait avec la normale, au point d'incidence, et l'angle de réflexion, celui que le rayon réfléchi fait avec cette même normale, en se relevant de l'autre côté et dans le même plan.

Puisque la chaleur obscure se propage par rayonnement, comme la chaleur lumineuse, il est probable aussi qu'elle se réfléchit comme elle. En effet, si, au boulet rouge de l'expérience précédente on substitue un corps simplement chauffé à la température de l'eau bouillante ou même à une température encore moindre, et si, en même temps, à la place de l'amadou, on met, au foyer de l'autre miroir, une des boules du thermomètre différentiel, on voit cette boule *focale* s'échauffer sensiblement. C'est bien par les rayons réfléchis qu'elle s'échauffe; car l'autre boule est, comme elle, exposée aux rayons directs et ne s'échauffe pas. La même expérience peut se faire avec un seul miroir, comme on le voit figure 214; c'est un cube rempli d'eau chaude, et un thermomètre qui en indique les températures.

Le pouvoir réfléchissant varie comme le pouvoir absorbant, suivant la nature du corps et suivant l'état de sa surface. Si les miroirs n'avaient pas le vif éclat du métal, s'ils étaient mal polis, s'ils étaient enfumés à la flamme d'une lampe ou seulement ternis, ils ne seraient plus capables d'allumer l'amadou, ni de produire les autres effets que nous venons d'observer. On voit même que ces deux pouvoirs ont entre eux une liaison nécessaire: les rayons qui ne sont pas réfléchis, en tombant sur un corps, sont certainement absorbés par sa surface, à moins que le corps ne soit transparent pour la chaleur; c'est pourquoi nous dirons en général que le pouvoir absorbant est en raison inverse du pouvoir réfléchissant, ou bien encore que le pouvoir absorbant est complément du pouvoir réfléchissant.

250. Pouvoir rayonnant. — Le pouvoir rayonnant, qu'on appelle aussi pouvoir émissif, est la faculté qu'ont les corps de rayonner ou d'émettre de la chaleur dans tous les sens, comme les corps lumineux rayonnent ou émettent de la lumière. Après avoir montré l'existence de cette faculté, en montrant l'existence de la chaleur rayonnante, nous allons

rechercher les causes qui font varier le pouvoir rayonnant d'un même corps et comparer entre eux les pouvoirs rayonnans des corps différens.

Le pouvoir rayonnant d'un corps ne dépend que de l'état de sa surface : il est d'autant moindre que la surface est plus nette et plus polie, et au contraire d'autant plus grand qu'elle présente plus de stries et d'aspérités. Pour le démontrer on prend un cube creux dont les quatre faces latérales sont de même substance et de même épaisseur : l'une d'elles a le plus haut degré de poli et de netteté, les autres sont diversement dépolies, striées et sillonnées dans des sens différens. Ce cube étant mis en présence d'un réflecteur (Fig. 214), à la distance de trois ou quatre pieds, on ajuste son centre pour qu'il se trouve sur l'axe, et avec une bougie on détermine le foyer f , où doit se placer la boule focale du thermomètre différentiel. Après cette disposition, le cube étant rempli d'eau chaude, ses quatre faces latérales auront la même température, et l'on pourra successivement, sans rien déranger, les tourner en présence du réflecteur. Or, on observe, dans cette expérience, des résultats fort différens pour les différentes faces. Par exemple, la face polie produisant dans la boule focale une élévation de température de 1° , la face la plus dépolie et la plus striée pourra produire une élévation deux ou trois fois plus grande, et les autres faces des résultats intermédiaires. Donc, la même substance, à la même température, peut avoir, suivant l'état de sa surface, des pouvoirs rayonnans très différens, et par conséquent, perdre par le rayonnement des quantités de chaleur très différentes dans le même temps.

Sans trop s'écarter de la vérité, on peut supposer d'une part que les quantités de chaleur qui reçoit la boule focale, sont proportionnelles aux excès de température qu'elle peut prendre; on peut supposer, d'une autre part, que les quantités de chaleur qu'elle reçoit sont proportionnelles aux quantités de chaleur rayonnante émise par les faces du cube, et, par conséquent, proportionnelles aux pouvoirs rayonnans de ces faces. Donc, *les pouvoirs rayonnans sont entre eux comme les excès de température de la boule focale*. Ainsi, la face polie donnant à cette boule un excès de température de 1° et la face la plus dépolie un excès de 3° , le pouvoir rayonnant de celle-ci est trois fois aussi grand que le pouvoir rayonnant de la première.

Pour comparer les pouvoirs rayonnans des différens corps, on peut se servir d'un cube pareil au précédent, ayant des faces latérales très minces et successivement recouvertes de substances différentes : de verre, de papier blanc, ou de diverses couleurs, de noir de fumée, etc. Toutes ces substances doivent former elles-mêmes des couches peu épaisses, afin que leurs surfaces soient exactement maintenues à la température de l'eau intérieure. En représentant par 100 le pouvoir rayonnant du noir de fumée, qui est le plus grand que

l'on observe, les pouvoirs rayonnans des autres substances seront proportionnellement représentés par des nombres plus petits, comme on le voit dans le tableau suivant :

Noir de fumée.	100
Eau.	100
Papier à écrire.	98
Crown-glass.	90
Encre de Chine.	88
Eau glacée.	85
Mercure.	20
Plomb brillant.	19
Fer poli.	15
Étain, argent, cuivre, or. . .	12

Lorsqu'une surface métallique polie est légèrement humectée de quelque liquide, d'eau, d'huile, etc., son pouvoir émissif est à l'instant augmenté dans une grande proportion; une couche extrêmement mince de vernis produit un effet analogue; et, ce qui est fort remarquable, une seconde couche ajoute encore à cet effet, une troisième pareillement, et ainsi de suite jusqu'à une certaine limite d'épaisseur. Il en résulte que les rayons de chaleur ne partent pas seulement de la surface mathématique des corps; mais qu'ils partent aussi des couches inférieures, jusqu'à une profondeur sensible au-dessous de cette surface. Ce qui arrive aux rayons émergens qui sont lancés au dehors doit arriver aussi aux rayons incidens qui viennent frapper les corps pour pénétrer dans leur intérieur; et, en effet, un miroir verni réfléchit un peu moins qu'un miroir nu et poli, et il réfléchit d'autant moins que la couche de vernis est plus épaisse. Donc, la réflexion se fait à une certaine profondeur au-dessous de la surface mathématique de la dernière couche de vernis; car si elle avait lieu sur cette surface, elle resterait la même, quelle que fût l'épaisseur de la couche.

261. *De l'équilibre mobile de la chaleur dans une enceinte dont les parois ont une température uniforme.* — Concevons une enceinte fermée de toutes parts (Fig. 207); supposons, pour plus de simplicité, qu'elle ait la forme sphérique, qu'elle soit vide, et que tous ses points aient au même degré le pouvoir de réfléchir, de rayonner et d'absorber la chaleur. La surface extérieure de cette enceinte étant maintenue d'une manière quelconque à une température invariable et uniforme pour tous les points, la surface intérieure aura la même température avec la même invariabilité et la même uniformité. L'équilibre aura lieu dans toute l'étendue de l'enceinte, quelle que soit sa grandeur, qu'elle ait un pied de diamètre ou qu'elle ait un million de lieues. Cela posé on peut concevoir l'équilibre de deux manières : premièrement on peut imaginer que la surface intérieure ait perdu sa faculté rayonnante, que chacun de ses points n'émette rien dans l'espace vide, et ne reçoive rien, que tout reste enfin dans le même état, et que le calorique soit

immobile; secondement, on peut admettre que, malgré l'équilibre, la surface intérieure conserve encore sa faculté rayonnante, que chacun de ses points émette dans tous les sens des rayons dans le vide, et qu'il en reçoive aussi dans tous les sens, que tout change enfin à chaque instant, et que le calorique soit sans cesse en mouvement, et la température sans cesse en équilibre. Ce second principe, énoncé pour la première fois par M. Prevost, de Genève, est ce qu'on appelle le principe de l'équilibre mobile de la chaleur. Certainement si les parois de l'enceinte étaient lumineuses au lieu d'être chaudes, il est évident que la lumière remplirait toute l'étendue qu'elles embrassent, que les rayons se renouvelleraient à chaque instant, et que dans toutes les directions chaque point en recevrait sans cesse autant qu'il en envoie. La clarté serait toujours la même, ou, si l'on veut, toujours en équilibre, et la lumière toujours en mouvement. Les analogies frappantes qui existent entre la lumière et le calorique rayonnant ne laissent aucun doute sur la vérité du principe de l'équilibre mobile de la chaleur. Cependant ces notions fondamentales sur le calorique rayonnant restaient vagues, et les nombreuses expériences auxquelles elles conduisaient restaient sans liaison, lorsque M. Fourier, en les soumettant à l'analyse mathématique, se plaça au premier rang parmi les géomètres et parmi les physiciens, car il eut la double gloire de reculer les bornes de l'analyse et de fonder en même temps une nouvelle théorie de la chaleur. C'est dans ses ouvrages, et dans ceux de M. de Laplace et de M. Poisson sur le même sujet, que l'on peut suivre dans tous ses développements cette branche féconde de physique mathématique, dont les géomètres du siècle dernier n'avaient pas même soupçonné l'existence.

Nous devons nous borner ici à indiquer quelques-uns des résultats les plus simples. Dans une enceinte vide, dont les parois sont maintenues à une température constante et uniforme pour tous les points, un thermomètre placé en un lieu quelconque se réchauffe ou se refroidit jusqu'à ce qu'il arrive enfin à la température de l'enceinte elle-même. C'est alors seulement que l'équilibre est établi et que le thermomètre reste immobile.

Ce résultat est indépendant de la forme et de la grandeur de l'enceinte; il est indépendant de l'état de sa surface, c'est-à-dire des pouvoirs réfléchissant, absorbant et rayonnant de ses différents points; il est indépendant de sa température : qu'elle soit à 100° au-dessous de 0, ou à 1000° au-dessus, tout se passe de même; enfin il est indépendant de la surface plus ou moins réfléchissante ou absorbante du thermomètre. Ainsi, quand l'équilibre est établi, le thermomètre s'approprie par l'absorption autant de chaleur qu'il en perd par l'émission; c'est ce qu'on exprime en disant que dans l'état d'équilibre le pouvoir absorbant d'un corps est toujours égal à son pouvoir rayonnant; mais quand le corps se ré-

chauffe, il reçoit plus qu'il ne perd, et au contraire quand il se refroidit il perd plus qu'il ne gagne. Dans tous les cas il y a échange et compensation plus ou moins complète; c'est ainsi que se résout la question du chaud et du froid, c'est-à-dire la question de savoir s'il y a des rayons frigorifiques comme il y a des rayons calorifiques. On voit, en effet, que les rayons frigorifiques n'existent pas; dans une enceinte qui serait à 100° au-dessous de 0, un corps recevrait de la chaleur des différents points de l'enceinte, car il se refroidirait moins vite que dans une enceinte à 200° au-dessous de 0, et moins vite à plus forte raison que dans une espace infini où il n'y aurait ni chaleur ni température.

252. *Réflexion du froid.* — Au foyer de l'un des miroirs (Fig. 213) on met au lieu d'amadou, un thermomètre différentiel ou même un thermomètre ordinaire; au foyer de l'autre miroir, au lieu du boulet rouge, on met un morceau de glace ou un matras rempli d'un mélange réfrigérant, et à l'instant on observe un abaissement de température : si l'on a employé le thermomètre différentiel, la boule focale tombe à plusieurs degrés au-dessous de l'autre boule, et si c'est un thermomètre ordinaire, il tombe pareillement à plusieurs degrés au-dessous de la température ambiante. Telle est l'expérience curieuse de la réflexion du froid; c'est M. Pictet, de Genève, qui la fit pour la première fois. Quelques physiciens ont voulu en écarter l'existence des rayons frigorifiques : il faut bien, disent-ils, que ces rayons existent et qu'ils soient distincts des rayons de chaleur, puisqu'en les accumulant sur le thermomètre au foyer d'un miroir, le thermomètre descend d'autant plus qu'on en accumule davantage; mais ce raisonnement tombe quand on considère le phénomène d'une manière complète : un thermomètre est toujours dans une enceinte; suspendu dans un appartement, ce sont les murs et les objets divers qui forment les parois de l'enceinte avec laquelle il échange sa chaleur; exposé à l'air libre, c'est la surface de la terre, les nuages et le ciel qui forment une autre enceinte plus vaste et plus irrégulière, mais dont tous les points rayonnent de la chaleur sur le thermomètre et on reçoit pareillement.

Ainsi, dans l'expérience précédente, les rayons de chaleur émanés du corps froid, en couvrant toute la surface du second miroir et en se réfléchissant vers le foyer où se trouve le thermomètre, produisent à peu près le même effet que s'ils étaient envoyés par le miroir lui-même. C'est donc comme si on présentait au thermomètre un corps froid, large comme le miroir. Or, il est visible (Fig. 208) que, si le segment *aa* d'une enceinte devenait plus froid que le reste des parois, le thermomètre e éprouverait un abaissement de température et un abaissement d'autant plus grand que le segment froid aurait lui-même plus d'étendue. Au lieu de refroidir les parois elles-mêmes, si on place un corps froid entre elles et le thermo-

mètre, le même effet est produit, le thermomètre ne perd pas plus de chaleur qu'il n'en perdait, mais il en reçoit moins, parce que le corps interposé est moins chaud que la surface de l'enceinte qu'il cache au thermomètre, et dont il intercepte les rayons.

253. *De la transmission du calorique rayonnant.*

— Ce n'est pas seulement à travers l'air que passe librement le calorique rayonnant, mais il passe encore de la même manière à travers l'eau, le verre et la plupart des corps diaphanes. Un écran de verre placé entre le corps chaud et le réflecteur ne diminue pas beaucoup l'élévation de température qu'éprouvait la boule focale, et le verre lui-même ne s'échauffe que très peu; il en est de même d'une feuille mince de mica ou de chaux sulfatée. Cependant la lumière elle-même éprouvait quelque absorption dans les corps les plus transparents, ou peut conclure par analogie, et vérifier aussi par expérience, que la chaleur rayonnante est en partie absorbée, quel que soit le milieu qu'elle traverse. Voici sur ce sujet deux résultats impor-

tants qui se déduisent des belles et nombreuses expériences de Delaroché.

Premièrement, la chaleur rayonnante qui émane des corps les plus chauds, traverse plus facilement les milieux diaphanes et s'y trouve absorbée en moindre proportion : par exemple, un écran de verre arrêtant les 17/18 de la chaleur émise par un corps à 180°, n'arrête que les 6/7 de la chaleur émise par un corps à 400°, et la moitié seulement de la chaleur émise par la flamme d'une lampe.

Secondement, la chaleur rayonnante qui a traversé une première lame de verre est absorbée en moindre proportion lorsqu'elle en traverse une seconde et une troisième. Il est probable que cette propriété singulière s'étend à tous les corps transparents, et qu'elle se manifeste aussi dans les milieux continus. D'après cela, les rayons de chaleur qui auraient traversé une couche d'air d'une certaine épaisseur, n'éprouveraient qu'une moindre absorption en traversant les couches suivantes, et pourraient ainsi se propager à des distances beaucoup plus grandes sans être complètement éteints.

CHAPITRE III.

DES LOIS DU REFROIDISSEMENT.

254. Depuis Newton, qui, le premier, a posé quelques principes sur le refroidissement des corps, les plus habiles physiciens ont fait des expériences et des recherches mathématiques sur ce sujet. Cependant la question restait enveloppée de difficultés insurmontables, et l'on n'avait fait que quelques pas incertains vers sa solution quand MM. Dulong et Petit sont parvenus à la résoudre d'une manière complète. Leur travail, qui fut couronné par l'Académie des Sciences en 1818, est un modèle d'exactitude et d'invention, que les jeunes physiciens ne peuvent étudier avec trop de soin. Nous ne pouvons ici en donner qu'un extrait fort abrégé.

255. *Loi du refroidissement dans le vide.* — Un corps isolé au milieu d'une enceinte vide ne peut se réchauffer ou se refroidir que par l'échange de chaleur rayonnante qui se fait entre sa surface et celle de l'enceinte. Si ce corps est solide, sa nature, l'état de sa surface, sa grandeur, sa forme et la conductibilité de sa substance auront une influence sur les résultats; s'il est liquide, le mélange qui se fait par les courants maintient toute la masse à la même température, l'influence de la conductibilité disparaît, et il n'y a plus à considérer que la nature du liquide, la surface du vase, sa grandeur et sa forme. Mais pour distinguer ce qui appartient à chacun de ces éléments, il faut savoir ce qu'on appelle *vitesse de refroidissement* et *loi de refroidissement*.

Lorsqu'un corps est plus chaud que les parois de l'enceinte dans laquelle il est placé, sa température diminue à mesure que le temps s'écoule, et sa vitesse de refroidissement pour un instant donné est le rapport qui existe entre l'abaissement de la température et la durée de cet instant.

Ainsi, lorsqu'un corps est beaucoup plus chaud que l'enceinte, et que son abaissement de température est, par exemple, de 10° en 1", sa vitesse de refroidissement est double de ce qu'elle sera, quand, après s'être refroidi de plus en plus, il arrivera à ne perdre que 5° en 1". Depuis le premier jusqu'au dernier instant du refroidissement, la vitesse est donc changeante et toujours décroissante, et l'on appelle loi de refroidissement la liaison qui existe entre toutes ces vitesses successives. Il en résulte que, pour deux corps donnés, les vitesses de refroidissement peuvent être fort différentes, tandis que la loi de refroidissement est la même; car il suffit pour cela que les vitesses correspondantes aux mêmes instans aient entre elles les mêmes rapports. MM. Dulong et Petit se sont d'abord assurés, par de nombreuses expériences, que la loi de refroidissement des liquides est toujours la même, et qu'elle ne dépend ni de la nature ni du volume du liquide, ni de la forme ni de la surface du vase, ni de la grandeur ni du pouvoir rayonnant de l'enceinte. Cette loi générale de refroidissement repose sur les principes suivants.

1^o. Lorsqu'un corps est en équilibre de température dans une enceinte sans pouvoir réfléchissant, dont la température est constante, la vitesse de son refroidissement est égale à la vitesse de réchauffement que l'enceinte tend à lui imprimer.

2^o. La vitesse absolue de refroidissement d'un d'un corps (c'est-à-dire celle qu'il aurait s'il ne recevait aucun rayon pour compenser ses pertes) augmente en progression géométrique lorsque la température de ce corps augmente en progression arithmétique.

Ainsi m étant la vitesse de son refroidissement à la température 0 , $ma^t + t$ sera la vitesse pour la température $t + t$. La raison a de cette progression est la même pour tous les corps quelle que soit leur nature. D'après cela, quand un corps dont la température est $t + t$ se trouve dans une enceinte dont la température est t , sa vitesse réelle de refroidissement n'est autre chose que sa vitesse absolue, diminuée de la vitesse de réchauffement due au calorique qu'il reçoit de l'enceinte. Cette vitesse de réchauffement est facile à trouver : en effet, l'enceinte étant à 0 , désignons par k sa vitesse absolue de refroidissement, c'est-à-dire celle qui se produirait si le calorique, au lieu de sortir d'un point de sa paroi pour aller tomber sur un autre, était détruit à l'instant même où il sort. Toute cette chaleur, que nous supposons ainsi anéantie, n'est pas absorbée par le corps; en réalité, il n'en arrête qu'une partie, qui lui donne un réchauffement dont la vitesse est m ; car cette même quantité m , qui représente sa vitesse absolue de refroidissement quand il est à 0 , doit représenter aussi la vitesse de réchauffement qu'il éprouve de la part d'une enceinte qui est à 0 comme lui, et dans laquelle il est en équilibre. A la température t , l'enceinte au lieu d'avoir une vitesse absolue de refroidissement égale à k , aura, par le second principe, une vitesse représentée par ka^t ; et par conséquent, au lieu de donner au corps une vitesse de réchauffement égale à m , elle lui donnera une vitesse de réchauffement égale à ma^t ; c'est donc là ce qu'il faut retrancher de $ma^t + t$ pour avoir la vitesse réelle de refroidissement du corps; et l'on a enfin, en représentant par v la vitesse de refroidissement,

$$v = ma^t + t - ma^t,$$

$$\text{ou} \quad v = ma^t (a^t - 1).$$

Telle est la loi remarquable du refroidissement dans une enceinte vide et qui ne réfléchit pas.

La valeur de a , qui est la même pour tous les corps, a été trouvée par expérience égale à 1,0077.

La valeur de m est variable pour les différents corps, et de plus elle est variable pour le même corps, suivant la masse et la forme qu'on lui donne, et suivant l'état de sa surface.

Ces expériences fournissent un moyen rigoureux de comparer les pouvoirs rayonnants des corps à des températures très élevées; et l'on trouve que le rapport de ces pouvoirs ne varie pas avec la température. Ainsi le rapport du pouvoir rayonnant du verre à celui de l'argent mat est 5,707 aux températures voisines de 300° comme aux températures voisines de 100°.

On peut voir aisément que, si l'enceinte avait un pouvoir réfléchissant, la loi de refroidissement serait la même, si ce n'est que m ne serait plus la vitesse absolue du refroidissement du corps à la température 0 .

256. *Loi du refroidissement dans les gaz.* — Un corps qui se refroidit dans une enceinte remplie de gaz, se refroidit par deux causes; 1^o par le rayonnement; 2^o par le contact du gaz. Or, un premier résultat très remarquable, c'est que la présence du gaz ne modifie en aucune manière les échanges de chaleur qui se font par rayonnement; d'où il résulte que, le refroidissement total qu'éprouve un corps plongé dans un gaz étant connu, il suffit d'en retrancher le refroidissement que ce corps éprouve dans le vide, pour avoir la partie du refroidissement qui est due au contact seul du gaz.

Les fluides élastiques qui ont été soumis à l'expérience sont : l'air, le gaz hydrogène, l'acide carbonique et le gaz oléifiant; voici les lois générales de leurs pouvoirs refroidissants.

1^o. Les pertes de chaleur dues au contact du gaz sont, toutes choses égales d'ailleurs, indépendantes de l'état de la surface du corps qui se refroidit.

2^o. Les pertes de chaleur dues au contact d'un gaz croissent avec les excès de température, suivant une loi qui reste la même, quelle que soit l'élasticité du gaz.

3^o. Pour une même différence de température, le pouvoir refroidissant d'un même gaz varie en progression géométrique, lorsque sa force élastique varie elle-même en progression géométrique; et, si l'on suppose le rapport de cette seconde progression égal à 2, le rapport de la première sera 1,366 pour l'air, 1,301 pour l'hydrogène, 1,431 pour l'acide carbonique, et 1,415 pour le gaz oléifiant.

257. Les propriétés du calorique rayonnant et les lois du refroidissement dans le vide et dans les gaz trouvent leurs applications dans une foule de phénomènes naturels. Nous verrons dans les *Éléments de Météorologie* que c'est en partant de ces principes que l'on peut expliquer la gelée, le givre et la rosée; que l'on peut rendre raison des températures de la terre aux diverses latitudes, de la température des eaux et des différentes régions de l'air, et que l'on peut enfin mesurer avec exactitude la quantité totale de chaleur que, dans une année, le soleil verse sur la terre.

QUATRIÈME PARTIE.

DE LA MESURE DE LA CHALEUR, ET DES CAUSES QUI LA PRODUISENT.

CHAPITRE PREMIER.

DE CALORIQUE SPÉCIFIQUE.

258. *Des quantités de chaleur et des moyens de les comparer.* — Nous admettons comme un principe évident de lui-même que, pour produire un même effet, il faut toujours une même quantité de chaleur. Par exemple, un kilogramme de fer étant à la température de 10° , s'il passe d'une manière quelconque à la température de 11° , nous admettons qu'il reçoit toujours la même quantité de chaleur, soit que cette chaleur lui vienne du soleil ou d'un foyer, soit qu'elle lui vienne du contact ou du rayonnement d'un corps quelconque. De même un kilogramme de glace à 0 , prend toujours la même quantité de chaleur pour se fondre, quelles que soient les circonstances de la fusion; et un kilogramme d'eau à 100° prend toujours la même quantité de chaleur pour se vaporiser, soit que l'évaporation soit lente ou rapide. Pour que l'effet soit le même, il ne suffit pas toutefois qu'il se produise sur des masses égales de la même matière, mais il faut que cette matière, identique par sa nature, soit identique aussi par l'arrangement de ses molécules. Ainsi, deux masses égales de fer, autrement travaillées, plus ou moins écrouées ou plus ou moins forgées, pourraient bien prendre des quantités de chaleur différentes pour passer de 10 à 11° ; deux poids égaux de glace, pour entrer en fusion, pourraient bien prendre aussi des quantités de chaleur différentes, si l'un était, par exemple, de la glace compacte, et l'autre de la neige ou de la glace pilée; enfin, une même quantité d'eau peut bien prendre en se vaporisant des quantités de chaleur différentes, suivant qu'elle se vaporise à 0 , par exemple, ou à 100° de température.

D'après ce principe fondamental, nous pourrions comparer des quantités de chaleur données, toutes les fois que nous pourrions les appliquer successivement à produire un même effet, c'est-à-dire à élever la température d'un corps, ou à liquéfier un solide, ou à vaporiser un liquide. Mais comme il faut pour cela que le calorique sorte des corps où il se trouve, pour passer dans les corps où il doit produire un de ces effets, il en résulte que nous ne pouvons jamais comparer les quantités totales ou absolues de calorique que possèdent les

corps; car nous ne pouvons jamais les épuiser de tout le calorique qu'ils contiennent. Nos mesures sont restreintes aux seules quantités de chaleur que nous pouvons faire sortir des corps.

On dit qu'une substance a plus ou moins de *capacité pour la chaleur*, suivant qu'elle exige plus ou moins de chaleur pour éprouver un changement de température donné, un changement de 1° , par exemple; et cette quantité de chaleur s'appelle elle-même la *chaleur spécifique* de la substance. Sa capacité sera *constante* lorsqu'à poids égal il faudra des quantités égales de chaleur pour élever sa température de 1° en un point quelconque de l'échelle thermométrique, c'est-à-dire pour la faire passer de 0 à 1° , de 1° à 2° , et de 100° à 101° , de 200° à 201° , etc. Ainsi le fer, par exemple, n'a pas une capacité *constante*, mais une capacité *variable et croissante*, parce qu'un kilogramme de fer exige une certaine quantité de chaleur pour passer de 0 à 1° , il en exige un peu plus pour passer de 100 à 101 , plus encore pour passer de 200 à 201 , etc. Le rapport de ses capacités pour deux points donnés de l'échelle, à 0 , par exemple, et à 300° , est le rapport des quantités de chaleur qu'il exige en chacun de ces points pour éprouver des changements égaux de température. En général, le rapport des capacités de deux substances n'est autre chose que le rapport de leurs chaleurs spécifiques, c'est-à-dire le rapport des quantités de chaleur qu'elles prennent à poids égal et au même degré, pour éprouver des changements égaux de température. On a coutume de rapporter toutes les capacités à celle de l'eau prise pour unité; ainsi, quand on dit que la capacité d'une substance est 2 , 3 , 4 , etc., cela signifie (à moins qu'on ne prévienne du contraire) que sa capacité est 2 , 3 ou 4 fois celle de l'eau. On dirait de la même manière et dans le même sens que la *chaleur spécifique* d'un corps est 2 , 3 , 4 , etc. D'après ces définitions, il sera facile de comprendre les méthodes et les instruments que l'on emploie pour déterminer les capacités ou les chaleurs spécifiques de différents corps.

259. *Calorimètre de Lavoisier et de Laplace.* — Une coupe de cet instrument est représentée dans

la Fig. 204 : il se compose de trois vases de tôle ou de fer-blanc c , e , et e_1 , dont le plus grand c enveloppe le moyen e , et celui-ci à son tour enveloppe le plus petit. L'intervalle qui sépare le premier du second se remplit de glace dont l'eau de fusion s'écoule par le robinet a , et l'intervalle qui sépare de toutes parts le second du troisième est pareillement rempli de glace pilée dont l'eau de fusion s'écoule par le robinet r . Ainsi, le calorique extérieur est arrêté et absorbé par la première couche de glace, et ne peut jamais pénétrer jusqu'à la seconde couche pour y opérer une fusion ; de même le calorique intérieur, celui qui sort de la substance enfermée dans le petit vase, est entièrement absorbé par la seconde couche de glace et employé à la fondre, sans pouvoir jamais passer dans la première couche, et, à plus forte raison, sans pouvoir jamais se perdre à l'extérieur. D'après cela, rien n'est plus facile à comprendre que l'usage de cet instrument pour résoudre les questions relatives à la capacité.

Pour savoir, par exemple, si la capacité du fer est constante, on chauffe un boulet à la température de 50° , on le met très rapidement dans le vase, on ajuste les couvercles, et on recueille toute la quantité d'eau qui s'écoule par le robinet r pendant que le boulet descend à la température 0 ; ensuite on refait la même expérience après avoir chauffé le boulet à 100 , 150 , 200° , etc. Les quantités de chaleur abandonnées sont entre elles comme les quantités de glace fondues ou comme les quantités d'eau qui s'écoulent ; et il est facile de voir qu'elles ne sont pas entre elles comme les nombres 1 , 2 , 3 , 4 , etc., mais dans une proportion plus rapide ; ce qui prouve que la capacité du fer est croissante dans la même proportion.

Pour déterminer les capacités des différents corps, on les chauffe tous successivement à la même température, et on recueille les quantités d'eau qu'ils fournissent en retombant à la température 0 . S'ils ont tous le même poids, leurs capacités sont comme les quantités d'eau qui s'écoulent ; sinon il faut tenir compte du rapport des poids.

Pour les liquides, on détermine d'avance les capacités des flacons dans lesquels ils doivent être enfermés.

Au lieu du calorimètre, on peut employer un *pycnomètre de glaces*, comme on le voit figure 205 ; cette méthode offre même de l'avantage, à cause de l'eau qui reste dans le calorimètre pour imbibber toute la couche de glace pilée qui enveloppe le corps.

200. Méthode du refroidissement. — Cette méthode, inventée d'abord par Mayer, perfectionnée par M. Leslie, et employée aussi par M. Despretz, n'a véritablement acquis une précision suffisante qu'entre les mains de MM. Dulong et Petit ; elle repose sur ce principe, que deux surfaces égales et également rayonnantes perdent dans le même temps

une même quantité de chaleur lorsqu'elles sont à la même température. Supposons donc qu'un vase d'argent poli, ayant un petit volume et des parois très minces, soit successivement rempli de différentes substances pulvérisées ; en le laissant refroidir, à partir d'une même température, les quantités de chaleur perdues au premier instant du refroidissement seront toujours égales entre elles, et si, pour l'une des substances, la vitesse de refroidissement est double de ce qu'elle est pour l'autre, on en pourrait conclure que sa capacité est moitié, si son poids était le même, puisqu'en perdant une même chaleur elle se serait abaissée d'un nombre de degrés double. On conçoit qu'il y a des corrections à faire, parce qu'en général les différentes poudres contenues dans le vase d'argent ont des poids différents, et aussi parce qu'il faut tenir compte de la chaleur propre du vase d'argent lui-même.

MM. Dulong et Petit prennent un vase de petite dimension, afin que les masses soient petites ; ils le prennent d'argent et à minces parois, afin que la conductibilité propre n'ait qu'une faible influence ; enfin ils le prennent poli, et le font refroidir dans un air très raréfié, avec un faible excès de température de 5° ou 10° au plus, afin que le refroidissement soit très lent. Toutes ces précautions ont une grande influence sur les résultats.

201. Méthode des mélanges. — Dans cette méthode on emploie toujours deux corps : un corps chaud qui se refroidit et un corps froid qui se réchauffe, de telle façon, que toute la chaleur qui sort du premier soit employée à élever la température du second. Supposons, par exemple, que l'on jette un kilogramme de mercure à 100° dans un kilogramme d'eau à 0° : le mercure se refroidit, et l'eau se réchauffe jusqu'à ce que le mélange ait acquis à la fin une température commune. Si cette température était de 50° , l'eau et le mercure auraient des capacités égales, puisque la même quantité de chaleur produirait dans ces deux substances, à masse égale, des changements égaux de température, d'une part 50° d'abaissement, et de l'autre 50° d'élévation. Mais, en réalité, le mélange ne s'élève qu'à 3° environ ; c'est-à-dire que le mercure perd 97° , tandis que l'eau en gagne 3 : donc la capacité du mercure est beaucoup moindre que celle de l'eau ; on voit qu'elle en est les $3/97$ ou environ les $0,03$. En général, pour des masses égales, les capacités sont en raison inverse des variations des températures.

Si les masses étaient différentes, on calculerait facilement le rapport des capacités. Soit x la capacité de la substance froide, m sa masse et t sa température primitive ; soit x' la capacité de la substance chaude, m' sa masse, et t' sa température ; soit θ la température du mélange.

La substance chaude perd un nombre de degrés $(t - \theta)$, et par conséquent une quantité de cha-

leur $\pi' (t' - t)$. La substance froide gagne un nombre de degrés $(t - t')$, et par conséquent une quantité de chaleur $\pi x (t - t')$; mais la quantité de chaleur perdue par la première est égale à la quantité de chaleur gagnée par la seconde. Donc

$$\pi' x' (t' - t) = \pi x (t - t'),$$

d'où
$$\frac{x}{x'} = \frac{\pi' (t - t')}{\pi (t' - t)}$$

Cette formule suppose que le vase dans lequel on fait le mélange ne participe pas aux variations de température, et qu'il n'y ait rien plus aucune chaleur perdue pendant la durée de l'expérience; mais il est facile, dans chaque cas, de faire les corrections nécessaires.

Les substances susceptibles de se combiner sont enfermées dans des flacons dont on détermine d'avance le poids et la chaleur spécifique.

262. *Colorimètre de Rumford.* — Cet appareil est surtout destiné à recueillir les quantités de chaleur abandonnées par les substances gazeuses : il se compose d'une caisse de fer-blanc ou de cuivre mince (Fig. 218), de 22 centimètres de longueur, sur 12 centimètres de largeur et 12 de profondeur, que l'on remplit d'un poids déterminé d'eau distillée; un thermomètre en indique à chaque instant la température; un serpent de métal très mince, de forme rectangulaire, ayant 4 centimètres de largeur sur 18 millimètres d'épaisseur, s'ouvre au-dessous de la caisse en forme d'entonnoir, et pénètre dans son intérieur où il fait diverses circulations. Les produits gazeux entrent par l'entonnoir, pressurent le serpent où ils se dépouillent de leur excès de chaleur et sortent enfin à la température de l'eau de la caisse. Pour que l'appareil conserve exactement toute la chaleur qu'il reçoit sans la dissiper au dehors, on détermine par des épreuves préalables la température à laquelle il doit s'élever au-dessus du milieu ambiant; s'il doit s'élever par exemple de 5°, on s'arrange pour lui donner une température de 5° au-dessous au moment où l'on commence l'expérience; alors pendant qu'il se réchauffe pour arriver à la température ambiante, il reçoit du calorique extérieur à peu près autant qu'il en perd lorsqu'il dépasse cette température pour arriver à 5° au-dessus.

C'est avec un calorimètre de cette espèce que MM. de la Roche et Bérard ont déterminé les chaleurs spécifiques des gaz. On conçoit aisément quelle habileté il faut pour des recherches aussi délicates, combien il y a de précautions à prendre et de corrections à faire.

263. Capacité des solides et des liquides.

Les tableaux suivants contiennent les résultats qui ont été obtenus par les divers procédés.

1. Tableau des capacités déterminées par MM. Lavoisier et de Laplace.

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉ.
Eau.	1,0000
Plomb.	0,0382
Mercure.	0,0790
Étain.	0,0475
Oxide rouge de mercure.	0,0501
Fer battu.	0,1105
Verre sans plomb.	0,1919
Soufre.	0,2085
Chaux vive.	0,2169
Huile d'olive.	0,3198
Acide sulfurique, densité 1,87.	0,5546
Acide nitrique, densité 1,50.	0,6614
Solution de nitre (nitre 1, eau 5).	0,8187

II. Tableau des capacités déterminées par la méthode des mélanges, par MM. Dulong et Petit.

NOMS DES SUBSTANCES.	capacité moyenne entre 0 et 100°.	capacité moyenne entre 0 et 500°.
Eau.	1,0000	"
Mercure.	0,0350	0,0350
Platine.	0,0355	0,0355
Antimoine.	0,0507	0,0547
Argent.	0,0557	0,0611
Zinc.	0,0937	0,1015
Cuivre.	0,0910	0,1013
Fer.	0,1098	0,1218
Verre.	0,1772	0,1900

III. Tableau des capacités déterminées par la méthode du refroidissement de MM. Dulong et Petit.

NOMS DES SUBSTANCES.	Capacité, celle de l'eau étant prise pour unité.	Poids des atomes, l'atome d'hydrogène étant pris 1.	Produit du poids de l'atome par la capacité.
Bismuth.	0,0288	15,32	0,4416
Plomb.	0,0295	12,95	0,3794
Or.	0,0298	12,43	0,3696
Platine.	0,0314	11,16	0,3504
Étain.	0,0514	7,35	0,3779
Argent.	0,0557	6,75	0,3759
Tellure.	0,0912	4,03	0,3675
Cuivre.	0,0927	4,25	0,3925
Nickel.	0,0949	3,97	0,3755
Cobalt.	0,1055	3,69	0,3881
Fer.	0,1100	3,39	0,3715
Soufre.	0,1498	3,46	0,5180
	0,1880	2,011	0,3780

Les résultats de MM. Dulong et Petit sont extrêmement remarquables.

Le 2^e tableau fait voir que les capacités vont en croissant d'une manière sensible à mesure que la température s'élève; il est probable que ce résultat est général.

Le 3^e tableau indique une loi fondamentale de la théorie de la chaleur; il indique que la capacité d'un corps simple multipliée par le poids de son atome donne un produit constant; car la 4^e colonne, qui représente ces produits, ne contient que des nombres très peu différents, dont la moyenne ne s'écarte pas sensiblement de 0,375; ce qui signifie en d'autres termes, que les atomes des corps simples ont tous exactement les mêmes capacités pour la chaleur. Ce résultat se vérifie d'une manière si frappante pour toutes les substances élémentaires rapportées dans le tableau, qu'il est permis d'espérer qu'un jour il sera généralisé par l'expérience, et qu'il constituera une des découvertes les plus importantes que nous puissions faire sur la chaleur. Il paraît résulter aussi de quelques essais de MM. Dulong et Petit, sur les corps composés, qu'il existe toujours un rapport simple entre la capacité des atomes composés et celle des atomes élémentaires.

264. *Capacité des gaz.* Les gaz n'ayant en général qu'une petite masse sous un grand volume, leurs molécules tendant sans cesse à s'échapper, et les pressions qu'ils supportent étant sans cesse changeantes, on conçoit qu'il est difficile de déterminer avec précision leurs capacités pour la chaleur. Ne pouvant entrer ici dans le détail de ces expériences délicates et compliquées, nous nous contenterons de rapporter les résultats qui ont été obtenus par MM. de la Roche et Bérard.

Tableau des chaleurs spécifiques des gaz, d'après MM. de la Roche et Bérard.

NOMS	Capacités à volume égal, celle de l'air étant 1.	Capacités à masses égales, celle de l'air étant 1.	Capacités à masses égales, celle de l'eau étant 1.
AIR ATMOSPHÉRIQUE.	1,0000	1,0000	0,1669
Hydrogène . . .	0,9035	12,3401	5,2936
Oxygène . . .	0,9765	0,8848	0,2361
Azote . . .	1,0000	1,0318	0,2734
Oxide de carbone.	1,0340	1,0805	0,2884
Acide carbonique.	1,1568	0,8280	0,2210
Oxide d'azote . .	1,3505	0,8878	0,2369
Gaz oléifiant . .	1,5530	1,5763	0,4207
Vapeur aqueuse.	1,9600	3,1560	0,6470

Nous venons de voir que les capacités des solides et des liquides paraissent en général devenir croissantes à mesure que les températures s'élèvent;

mais on admet au contraire que sous la même pression la capacité d'une masse gazeuse est indépendante de la température, c'est-à-dire, en d'autres termes, que, sous une pression constante, les dilatations qu'elle éprouve sont proportionnelles aux quantités de chaleur qu'elle reçoit. M. de Laplace admet en outre dans sa théorie des gaz (*Mécanique céleste*, liv. XII) un second principe fondamental: savoir, qu'il y a un rapport invariable entre la capacité d'un gaz à pression constante et sa capacité à volume constant. Sa capacité à pression constante est la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 1°, en lui permettant de se dilater sous la même pression; et sa capacité à volume constant est la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 1°, en le comprimant à mesure, pour que son volume ne change pas.

La première de ces capacités est évidemment plus grande que la seconde, puisque tous les gaz dégagent de la chaleur quand on les comprime; ainsi, ce rapport étant désigné par κ , la valeur de κ sera toujours plus grande que l'unité. On ne la connaît jusqu'à présent que pour l'air et la vapeur d'eau; pour l'air, on a, d'après les expériences de MM. Gay-Lussac et Welter, $\kappa = 1,375$; pour la vapeur d'eau, M. Poisson trouve, d'après les expériences de MM. Clément et Desormes, que l'on aurait $\kappa = 1,073$. En s'appuyant sur ces seuls principes, M. Poisson arrive par le calcul (*Ann. de Chimie*, t. 23, pag. 337) à une formule générale qui donne la capacité d'un gaz sous une pression quelconque, lorsqu'on connaît sa capacité sous une pression donnée, par exemple, sous la pression de 760^{mm}. Cette formule est la suivante:

$$x = c \left(\frac{760}{p} \right)^{1 - 1/\kappa}$$

c est la capacité du gaz par rapport à l'eau.

p est la pression pour laquelle on veut connaître sa capacité.

x est la capacité cherchée.

Pour l'air on a $c = 0,2669$, $\kappa = 1,375$; et la formule devient

$$x = 0,2669 \left(\frac{760}{p} \right)^{1 - 1/1,375}.$$

La capacité décroît quand la pression augmente, et, sous une pression de 1,000 atmosphères, elle n'est plus que 1/25 à peu près de la capacité de l'eau; au contraire elle est croissante à mesure que la pression diminue, et quand elle est réduite à 5 ou 6 millimètres à peu près, la capacité de l'air devient égale à celle de l'eau. Cette propriété est, comme nous le verrons, une des principales causes du froid si étonnant qui règne dans les hautes régions de l'air.

CHAPITRE II.

DE CALORIQUE LATENT.

265. *Calorique de fluidité.* — Nous avons déjà indiqué (145 et 223) les observations dans lesquelles on reconnaît l'absorption du *calorique latent* ou du *calorique de fluidité* pendant la liquéfaction des corps. Il est visible maintenant que ces quantités de chaleur peuvent être déterminées par les moyens qui viennent de nous servir à comparer les chaleurs spécifiques des corps ; et entre ces moyens, le calorimètre et la méthode des mélanges seront les deux plus simples.

266. *Calorique de fluidité de la glace.* — Pour le déterminer avec précision, il suffit de prendre un poids connu de glace fondante, 1 kilogramme, par exemple, et d'y mêler très promptement 1 kilogramme d'eau à 75° ; après quelques instans, la glace est fondue, et l'on a deux kilogrammes d'eau liquide, dont la température est 0, comme la température de la glace. Donc toute la quantité de chaleur qui maintenait le kilogramme d'eau à 75° au-dessus de 0, a été absorbée par la fusion du kilogramme de glace, et se trouve ainsi la mesure exacte de sa chaleur latente. Quand la température ambiante est plus haute que 0, l'eau chaude perd de sa chaleur pendant qu'on la verse, et, au contraire, le vase où se fait le mélange reçoit du calorique extérieur pendant toute la fusion ; alors on n'arrive au résultat précédent qu'après les corrections nécessaires. Dans tous les cas, il importe que le mélange se fasse promptement, et pour cela il convient de prendre de la glace pilée, ou de la neige plutôt que de la glace compacte en un seul bloc.

La capacité de l'eau étant sensiblement constante entre 0 et 100°, la chaleur qui fait passer 1 kil. d'eau de 0 à 75° est sensiblement égale à celle qui fait passer 75 kil. d'eau de 0 à 1°, ou plus généralement elle est égale à celle qui fait passer m kil. d'eau de 0 à 75°/m. D'après ce principe on peut varier l'expérience précédente de mille manières ; et l'on peut aussi résoudre une foule de questions avec lesquelles il est bon de se rendre familier.

Par exemple : Combien faut-il mêler de glace fondante dans 10 kil. d'eau à 100°, pour réduire la température à 0 après la fusion complète de la glace ?

Combien faut-il de kilogrammes d'eau à 50° pour fondre 50 kil. de glace fondante, et pour que la température du mélange après la fusion complète soit de 10° ?

Lorsqu'on mêle 20 kil. d'eau à 90° avec 1/20 kil. de glace fondante, quelle est la température du mélange ?

Qu'arriverait-il si les 20 kil. d'eau à 90° étaient mêlés avec 100 kil. de glace fondante ?

Le calorimètre de M. Lavoisier et de Laplace peut servir à déterminer le calorique de fluidité de l'eau ; il suffit pour cela de jeter dans son intérieur une masse d'eau de poids et de température connue, et d'observer la quantité de glace fondue ; 1 kil. d'eau à 10° donnerait, par exemple, 1,133 kil. d'eau à 0 ; d'où l'on déduirait facilement que 1 kil. d'eau à 75° donnerait 2 kil. d'eau à 0.

267. Le calorique de fluidité des autres substances se détermine par des procédés analogues. On admet assez généralement qu'un corps a d'autant plus de calorique de fluidité que son point de fusion est plus élevé ; mais cette loi demanderait confirmation : elle repose seulement sur trois expériences de Black, qui sont sans doute assez imparfaites. Ces expériences sont relatives au spermacéti, à la cire et à l'étain. D'après Black.

1 kilogramme de spermacéti, en se congelant, pourrait fondre. 1 kil., 1 de glace.

1 kilogramme de cire. 1 kil., 3

1 kilogramme d'étain. 3 kil., 7

268. *Calorique d'élasticité.* — Nous appellerons ainsi le *calorique latent* qu'un liquide absorbe en se vaporisant ; son existence nous est démontrée par la fixité de la température pendant l'ébullition des liquides (145 et 235) et par le refroidissement produit pendant leur évaporation (241). Le calorique d'élasticité qui est propre à chaque vapeur se détermine à peu près comme le calorique de fluidité qui est propre à chaque liquide, c'est-à-dire par le calorimètre ou par la méthode des mélanges.

269. *Calorique d'élasticité de la vapeur d'eau.* — La méthode la plus ordinaire pour le déterminer consiste à faire bouillir de l'eau distillée dans un matras à long col, ou dans une cornue, et à condenser dans une masse d'eau toute la vapeur qui s'échappe ; de l'augmentation de poids de cette masse d'eau on déduit la quantité de vapeur qui s'est condensée, et de l'élévation de température qu'elle prend on déduit la quantité de chaleur que cette vapeur a dégagée. Supposons, par exemple, que le vase où la vapeur se condense contienne d'abord 5500° d'eau à la température 0 ; par l'arri-

vée de la vapeur, son poids augmente et sa température s'élève; enfin, après un certain temps, son poids est augmenté de 100 grammes, et sa température élevée de 100°. Ces 100 grammes de vapeur condensée se retrouvant à 100° comme avant la condensation, il est évident qu'ils n'ont perdu que leur calorique d'élasticité. Donc enfin le calorique d'élasticité contenu dans 100 grammes de vapeur à 100° et sous la pression de 760^{mm}, est précisément capable d'élever 550 grammes d'eau de 0 à 100°. Un seul gramme de vapeur, dans les mêmes circonstances, ne produirait que la centième partie de cet effet, c'est-à-dire qu'en se condensant, il élèverait de 1° la température de 550^{gr.} d'eau. Ce résultat est en effet le nombre qu'on adopte en général, d'après les expériences de MM. Gay-Lussac, confirmées un peu plus tard par celles de MM. Clément et Desormes. Rumford avait trouvé 567 au lieu de 550, et M. Despretz trouve 530 ou 540 seulement. Une des principales causes d'erreur dans ces expériences est la quantité d'eau liquide que la vapeur entraîne avec elle lorsqu'elle vient se condenser dans la masse d'eau froide.

Pour simplifier les raisonnemens ou à coutume, en parlant d'un poids donné de vapeur, de prendre pour unité de calorique la quantité de chaleur qui est nécessaire pour élever de 1° la température d'un poids égal d'eau liquide. Ainsi, de l'eau à 100° absorbe en se vaporisant 550 unités de chaleur; de l'eau à 0 en prendrait 650, savoir : 100 pour passer de 0 à 100°, en restant liquide, et 550 pour se transformer en vapeur sans changer de température.

Une question très importante sur la vapeur d'eau est la question de savoir si les quantités de chaleur qu'elle absorbe pour se former sont indépendantes des températures auxquelles elle se forme; si, par exemple, un gramme d'eau prend autant de chaleur pour se vaporiser à 0 que pour se vaporiser à 100 ou à 150°. Beaucoup de recherches ont été faites sur ce point, et toutes s'accordent à établir ce principe fondamental : *que dans un gramme de vapeur au maximum de force élastique il y a toujours la même quantité de chaleur, quelle que soit la température.* Ainsi 1 gramme d'eau étant peis à 0, la somme des quantités de chaleur qu'il faudra lui donner pour l'élever à 140°, et ensuite pour le vaporiser à cette température sous la pression maximum de 3,500^{mm}, sera sensiblement la même que la somme des quantités de chaleur qu'il aurait fallu lui donner pour l'élever à 100° et le vaporiser à cette température sous la pression maximum de

760^{mm}, ou pour l'élever à 10° et le vaporiser à cette température sous la pression maximum de 9^{mm},475, ou enfin pour le vaporiser directement à 0 sous la pression maximum de 5^{mm},059. Cette vérité semble moins étonnante lorsqu'on prend garde à la prodigieuse différence de volume que prend la vapeur dans ces différens cas : à 0, par exemple, 1 gramme de vapeur occupe un espace de 150,000 centimètres cubes, et à 150°, un espace seulement de 332 centimètres cubes. Réciproquement 1 gramme de vapeur au maximum de force élastique étant pris à une température quelconque, puis condensé et ensuite réduit à 0, dégagera toujours la même quantité de calorique, c'est-à-dire 650 unités.

Nous indiquerons ici quelques questions qui peuvent être résolues par ces principes.

On a 100 litres d'eau à 0; quel poids de vapeur faut-il y condenser pour que le mélange soit à 30°?

Dans 100 litres d'eau à 30° on remplace 10 litres d'eau chaude par 10 litres d'eau froide à 10° : combien faut-il y condenser de vapeur pour que la température soit ramenée à 30°?

Dans une masse d'eau qui est maintenue à 50°, on fait entrer de la vapeur à 100°, ayant une tension de 760^{mm}; cette vapeur traverse un serpentin, où elle se condense en partie; ce qui ne se condense pas sort à la température de 50°, avec la tension maximum de 89^{mm}; on demande quel est le rapport entre la vapeur qui se condense et celle qui s'échappe, et quelle est la quantité de chaleur dégagée par chaque gramme de vapeur qui entre.

270. *Calorique d'élasticité de diverses vapeurs.* —

M. Despretz a fait quelques expériences pour déterminer le calorique d'élasticité des vapeurs d'alcool, d'éther sulfurique et d'essence de térébenthine.

Le résultat de ses recherches est le suivant :

Alcool.	207,7
Éther sulfurique. . .	96,8
Essence.	78,8

C'est-à-dire que 1 gramme d'alcool en se condensant à la température de 78°,8 qui est celle de l'ébullition, abandonne assez de chaleur pour élever de 1° la température de 207,7 grammes d'eau; l'éther sulfurique en pourrait élever de 1° que 96°,8 et l'essence de térébenthine 76°,8. Le point d'ébullition de l'éther est 35°,5; celui de l'essence 156°. On voit que le calorique d'élasticité est moindre pour les vapeurs dont la densité est plus grande; mais il n'est pas en raison inverse des densités.

CHAPITRE III.

DE LA CHALEUR DE COMBINAISON ET DE LA CHALEUR ANIMALE.

271. Toute combinaison chimique dégage de la chaleur ou du froid. Cette vérité générale est établie sur l'ensemble des faits que la chimie a pu recueillir, soit dans la nature inorganique, soit dans le développement de la végétation, soit dans l'accroissement des corps vivans et dans le renouvellement continu de leur substance pondérable. Toutes ces quantités de chaleur dégagées ou absorbées, tantôt par l'intime union des éléments matériels, tantôt par leur ségrégation, peuvent être comparées et mesurées comme les chaleurs spécifiques ou les chaleurs latentes.

Nous nous contenterons d'indiquer ici les méthodes par lesquelles on détermine la chaleur développée par la combustion, et la chaleur développée par la respiration des animaux.

272. *Chaleur produite par la combustion.* — Pour mesurer la quantité de chaleur dégagée par la cire d'abeille, par exemple, on pèse une bougie, on l'allume et on la laisse brûler paisiblement sous la bouche du serpent du calorimètre de Rumford (Fig. 216). Les produits de la combustion s'élèvent rapidement, parcourent les circonvolutions du serpent, y déposent l'excès de leur chaleur, et aèrent à la température de l'eau du calorimètre. Au commencement de l'expérience la température de l'appareil est à 5 ou 6° au-dessous de la température ambiante, et à la fin elle est à 5 ou 6° au-dessus; par cette précaution on est dispensé de tenir compte de la chaleur gagnée ou perdue à l'extérieur.

Connaissant le poids du calorimètre lui-même et la capacité du cuivre dont il est fait; connaissant le poids de l'eau qu'il contient et la température à laquelle elle s'élève; connaissant enfin le poids de la cire brûlée, on peut déterminer, par le calcul et en faisant les corrections convenables, toute la quantité de chaleur que dégage 1 gramme de cire en brûlant dans l'air. On trouve ainsi que 1 gr. de cire produit assez de chaleur pour élever de 1° un poids d'eau liquide d'environ 10,000 gr.; on a coutume d'exprimer ce résultat d'une autre manière, en disant qu'il produit assez de chaleur pour élever de 10,000° la température de 1 gr. d'eau. Le premier énoncé représente une réalité, le second est tout-à-fait conventionnel; car on ne sait ce que c'est qu'une température de 10,000°.

Le même procédé s'applique à la combustion des

autres substances, mais dans tous les cas il a l'inconvénient de laisser échapper une grande partie de la chaleur rayonnante, qui traverse l'air ambiant sans être recueillie dans l'appareil.

MM. Lavoisier et de Laplace faisaient brûler les corps dans la chambre intérieure de leur calorimètre; mais il y a aussi quelque inconvénient à cette méthode, parce qu'il faut renouveler l'air qui alimente la combustion, et tenir compte des effets qu'il peut produire.

M. Despretz a aussi fait quelques expériences par une autre méthode.

Voici un tableau des résultats qui ont été obtenus. La lettre R indique les nombres de Rumford, les lettres LL ceux de MM. Lavoisier et de Laplace, et la lettre D ceux de M. Despretz.

Tableau des quantités de chaleur dégagées par la combustion de diverses substances.

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	Élévation de température que 1 gr. de substance allumée en se brûlant avec l'oxygène communiquait à 1 gr. d'eau.	Élévation de température que 1 gr. d'oxygène ou d'air allumé avec la substance com- muniquait à 1 gr. d'eau.
Fer.	» D.	5325
Hydrogène.	25400° LL.	2910
Idem.	» D.	2578
Huile d'olive.	11166 LL.	3696
Idem.	9644 R.	2993
Cire blanche.	16500 LL.	3555
Idem.	9479 R.	3029
Huile de colza épurée.	9307 R.	»
Suif.	8369 R.	»
Idem.	7186 LL.	»
Éther sulfurique.	8030 R.	3136
Phosphore.	7500 LL.	5885
Charbon	7226 LL.	2722
Idem.	» D.	2967
Naphte.	7338 R.	»
Alcool à 42° Beaumé.	6195 R.	3019
Idem, plus aqueux.	5422 R.	»
Idem, à 53°	5261 R.	»
Bois très sec.	4514 R.	3093

273. *De la chaleur animale.* — Les corps organisés semblent se soustraire aux lois générales de la chaleur, car ils ne sont presque jamais à la température des milieux dans lesquels ils vivent. Le corps humain n'est point à la température de l'air qui l'environne : les animaux des régions polaires sont plus chauds que la glace sur laquelle ils reposent ; ceux des régions équatoriales plus froids que l'air brûlant qu'ils respirent ; les oiseaux ne sont point à la température de l'atmosphère, ni les poissons à la température de l'eau où ils sont plongés. Il y a donc dans les corps organisés quelque chaleur propre, ou plutôt quelque moyen de produire, suivant le besoin, de la chaleur ou du froid ; en la matière pondérable qui les compose doit nécessairement, comme matière pondérable, être soumise aux lois générales de l'équilibre de température. Cette question fondamentale de la chaleur des corps vivants se réduit à trois points essentiels que nous allons successivement examiner : 1^o quelle est leur température ? 2^o quelles sont les quantités de chaleur qu'ils peuvent produire dans un temps donné ? 3^o par quels moyens ces quantités de chaleur peuvent-elles être produites ?

274. *De la température du corps humain.* — La température intérieure paraît être la même dans les différents organes, et elle paraît être la même aussi que celle qu'on obtient en plaçant un petit thermomètre sous la langue, et en tenant la bouche exactement fermée pendant tout le temps que le thermomètre éprouve des variations. Cette température est de 37^o ; l'état de santé et de maladie, l'âge et le climat n'y peuvent produire que de légères différences. M. John Davy a fait sur ce point des observations curieuses dans le cours de ses voyages, et surtout dans une traversée des ports de l'Angleterre à l'île de Ceylan. En passant à diverses latitudes la température de plusieurs hommes de l'équipage, il a reconnu qu'elle s'accroît en arrivant dans les pays chauds ; cet accroissement toutefois est assez faible ; car il ne s'élève qu'à 1^o environ. En même temps M. John Davy a pris des températures sur des naturels de Ceylan, sur des Hottentots, sur des nègres de Madagascar et de Mozambique, sur des Albinos, sur des Malais, sur des Cipayes, sur des prêtres de Boudha, qui ne mangent que des légumes, et sur des Vaidas, qui ne mangent que de la viande. Toutes ces températures sont très peu différentes ; la plus basse de toutes est de 35,8 ; elle appartient à deux Hottentots du cap de Bonne-Espérance : la plus élevée se trouve de 38,9 ; elle appartient à deux enfans d'Européens, nés à Colombo, l'un de huit ans et l'autre de douze.

275. *Température des animaux.* — M. John Davy a fait encore sur ce point la série d'observations la plus complète qui nous soit connue, et sans doute aussi la plus exacte. Voici le tableau de ses résultats.

Tableau des températures de divers animaux, observées par M. John Davy.

	Température en degrés centigr.	Température en degrés Fahrenheit.	Lieu de l'observation.
Mammifères.			
Singe	+ 39,7	- 30 ^o	Colombo.
Pangolin	26,7	17	Idem.
Goutte-mourin	37,8	26	Idem.
Idem	38,3	28	Idem.
V. vampire	37,8	21	Idem.
Ecureuil	38,8	27	Idem.
Rat commun	38,8	26,5	Idem.
Lèvre commun	37,8	26,5	Idem.
Ichneumon	38,5	27	Idem.
Tigre	37,2	26,5	Idem.
Chien	36,0	26	Kandy.
Idem	29,6	25	Idem.
Jabal	38,3	29	Colombo.
Chat commun	36,5	15	London.
Idem	38,9	26	Kandy.
Fauçière	36,9	27	Colombo.
Chaval (race arabe)	37,5	26	Kandy.
Mouton	39,5 + 39,0	En été.	Ecône.
Idem	38,5 + 39,5	19	Cap de Bonne-Esp.
Idem	50,0 + 50,5	26	Colombo.
Roeux	29,5	26	Idem.
Chèvre	40,0	26	Idem.
Bœuf	38,9	En été.	Edinburgh.
Idem	38,9	26	Kandy.
Elan femelle	29,4	23,6	Colombo.
Porc	40,5	25,6	Pres de l'Indochine.
Elephant	37,5	26,7	Colombo.
Macrot	37,8	32,7	En mer lat. 8° 33' N.
Oiseaux.			
Miler	57,2	25,3	Colombo.
Charbonnet	40,9	12,6	London.
Peroquet	41,1	29	Kandy.
Choucas	42,1	33,3	Ceylan.
Grise commune	42,4	15,5	London.
Mouette commune	42,1	26,6	Kandy.
Fagot commun	42,1	44,5	London.
Idem	43,0	25,5	Colombo.
Idem	43,5	25,5	Idem.
Poule de Jangles	47,0	25,5	Ceylan.
Idem	42,5	25,5	Idem.
Poule commune	42,5	4,5	Edinburgh.
Idem	43,5	25,5	Colombo.
Idem	42,2	25,5	Idem.
Coq vieux	43,5	25,5	Idem.
Coq adulte	43,9	25,5	Idem.
Poule de Guinée	43,9	25,5	Pres de Colombo.
Coq d'Inde	42,7	25,5	Idem.
Perdrix	40,3	26	En mer; lat. 2° 30' N.
P. Lagomys	40,8	15	Idem; lat. 34° S.
Oie commune	41,7	23,3	Pres de Colombo.
Canard commun	43,9	23,6	Idem.
Amphibies.			
Tortue	28,9	26	En mer; lat. 2° 27' N.
Idem	29,4	32	Colombo.
T. Geomètres	16,9	16	Cap de Bonne-Esp.
Idem	30,5	26,6	Colombo.
Rana Ventricosa	23,0	26,7	Kandy.
Iguana	29,0	27,8	Colombo.
Reptent	31,4	27,5	Idem.
Idem	28,2	26,1	Idem.
Idem	32,2	28,3	Idem.
Poissons.			
Requin	25,0	23,7	En mer; lat. 5° 23' N.
Boutre, au cœur	27,8	27,2	Idem; lat. 1° 14' S.
- dans le muse. latér.	37,2	27,2	Idem.
Traite commune	16,4	15,3	Pres Edinburgh.
Poisson volant	25,5	23,3	En mer; lat. 6° 37' N.
Mollusques.			
Huître commune	27,8	27,8	Pres de Colombo.
Limacée	24,6	26	Kandy.

Crustacés.

Écrevisse	26,1	26,7	Columbo.
Crabe	22,2	22,2	Environ de Kandy.

Insectes.

Scarabée	5,0	24,5	Kandy.
Ver-luisant	23,5	22,8	Idea.
Betta acrobatis	23,9	24,5	Idea.
Idem	25,9	25,5	Idea.
Grillon	22,5	16,7	Cap de Bonne-Espér.
Gaïgne	24,5	25,9	Kandy.
Scorpion	23,5	28,1	Idea.
Julus	25,8	24,6	Idea.

Remarques. — Pour les amphibiens, le nombre qui se trouve dans la colonne de la *température ambiante* est la température de l'air; pour les poissons, l'humidité commune et le crabe, c'est la température de la mer.

On voit que les oiseaux sont de tous les animaux ceux dont la température est la plus élevée; les mammifères occupent le second rang; viennent ensuite les amphibiens, les poissons et certains insectes; la dernière classe comprend les mollusques et les crustacés, qui sont sensiblement à la température ambiante, ainsi que les vers sur lesquels on a jusqu'à présent fait des expériences.

La bonite offre un exemple remarquable: la mer étant à 27,2, la température de la bonite s'est trouvée de 27,8 au cœur, et de 37,2 dans les muscles intérieurs; le cœur est très près de la surface.

270. Quantités de chaleur produites par divers animaux. — Ces quantités de chaleur peuvent être déterminées par le calorimètre, et M. Lavoisier et de Laplace n'avaient pas manqué d'appliquer leur instrument à ce genre de recherches. Dernièrement M. Dulong a employé un autre moyen, qui est sans doute le plus précis et le plus ingénieux que l'on puisse imaginer; son beau travail sur ce sujet n'est point encore publié, et nous ne pourrions donner ici qu'une idée générale de son appareil et de ses résultats. L'animal que l'on soumet à l'épreuve est enfermé, fort à son aise, dans une caisse en cuivre mince, qui est plongée dans une grande masse d'eau; l'air nécessaire à la respiration lui est fourni par un gasomètre; les produits de la respiration sont conduits au dehors; ils sortent à la température de la masse d'eau; ils sont recueillis et analysés. L'expérience dure environ deux heures, et par l'élevation de température de l'eau, on juge, après avoir fait toutes les corrections, quelle est la quantité de chaleur qui a été fournie par l'animal

en expérience. M. Dulong a déterminé ces quantités de chaleur avec une grande précision, sur des individus de différentes espèces, jeunes ou adultes, carnivores ou frugivores. Ces animaux n'ayant à souffrir ni gêne ni fatigue, en conçoit que s'ils perdent de la chaleur à chaque instant, il faut qu'à chaque instant ils en reproduisent en égale quantité, et nous allons voir par quels moyens.

277. Causes principales de la chaleur des animaux. — L'air qui a servi à la respiration est altéré comme l'air qui a servi à la combustion. L'oxygène s'est en partie combiné avec du carbone, pour former de l'acide carbonique; donc il se fait dans les poumons une véritable combustion. Quand Lavoisier eut fait cette découverte, la chaleur animale ne fut plus un mystère; on en vit la source dans le phénomène de la respiration. Cependant il faut mesurer cette source et savoir si, à elle seule, elle compense exactement les pertes; c'est ce qu'a fait M. Dulong. Après avoir déterminé, comme nous venons de le voir, la quantité de chaleur perdue par un animal dans un temps donné, il a cherché la quantité de chaleur produite par la respiration. L'air qui est fourni à l'animal est mesuré par le gasomètre; les altérations qu'il éprouve sont données par l'analyse. Voici quelles elles sont: 1° il sort plus humide; 2° une partie de l'oxygène est remplacée par de l'acide carbonique; 3° une autre portion de l'oxygène disparaît; 4° l'azote n'éprouve que de faibles variations. Admettant que l'oxygène qui est passé à l'état d'acide carbonique s'est réellement combiné avec du carbone pendant l'inspiration, ou après avoir été absorbé, on peut calculer la quantité de chaleur qui en résulte. Admettant ensuite que la quantité d'oxygène qui a disparu s'est combinée avec de l'hydrogène pour former de l'eau, on peut pareillement calculer la quantité de chaleur qui en résulte. La somme de ces deux quantités de chaleur représente certainement toute la chaleur que la respiration peut produire; or, cette somme représente, dans certains cas, les 9/10 de la chaleur perdue par l'animal, et, dans d'autres cas, les 8/10 seulement. Tel est le résultat curieux auquel M. Dulong a été conduit. Il paraît donc qu'il y a dans les animaux, outre la respiration, quelque autre source de chaleur. Il reste à savoir si elle se trouve dans les sécrétions diverses qui se font à chaque instant, ou si elle est plus isolée et dépendante de l'action plus ou moins énergique du système nerveux.

CHAPITRE IV.

DES SOURCES DE CHALEUR ET DE FROID.

278. *De la chaleur des Gaz soumis à des actions mécaniques.* — Tous les gaz dégagent de la chaleur par la compression. L'expérience en peut être faite au moyen d'un appareil semblable au briquet à air (Fig. 1). Le gaz que presse le piston étant de l'air atmosphérique, ou de l'oxygène, tout le monde sait qu'une vive pression dégage assez de chaleur pour enflammer de l'amadou. Les autres gaz ne produisent pas l'inflammation parce qu'ils ne sont pas des corps combustibles, mais tous s'échauffent, et trois d'entre eux, l'air, l'oxygène et le chlore, par une compression forte et subite s'échauffent assez pour devenir lumineux dans les ténèbres. On avait admis ce résultat comme une propriété caractéristique des gaz dont il s'agit; mais M. Thénard a démontré dernièrement, par une série d'expériences curieuses, que ces gaz ne deviennent lumineux que parce qu'ils se combinent avec la graisse du piston, ou avec quelques autres corps étrangers. (*Ann. de chim. et de phys.*, tome. XLIV, pag. 181.)

Réciproquement tous les gaz produisent du froid par l'expansion. Pour s'en assurer, on suspend un thermomètre au milieu d'une cloche ou d'un ballon dont on aspire l'air par la machine pneumatique. Dès le premier coup de piston, le thermomètre descend; s'il a peu de masse et une grande sensibilité, on peut le faire descendre ainsi à 8 ou 10 au-dessous de la température ambiante. Les autres gaz produisent des effets analogues.

Il paraît que ce double effet se produit dans les appareils à gaz portatif pour l'éclairage; ces appareils sont de forts cylindres, de deux ou trois pieds de long, terminés aux deux bouts par des hémisphères; lorsqu'on les met en communication avec le gazomètre pour les remplir sous une trentaine d'atmosphères, on observe un abaissement de température à l'extrémité par laquelle entre le gaz, et une élévation de température à l'extrémité opposée.

Ces deux phénomènes de production et d'absorption de chaleur s'expliquent d'une manière satisfaisante par les changements de capacité qui accompagnent dans les gaz les changements de densité. En supposant que la compression ou l'expansion se fasse dans un vase imperméable à la chaleur, M. Poisson arrive à la formule suivante pour exprimer les variations de température qui correspondent aux variations de volume.

$$x = (266,67 + t) \left(\frac{d}{d'} \right)^{\kappa - 1} - 266,67.$$

t est la température primitive du gaz;
 d sa densité primitive;
 d' sa densité après la compression ou l'expansion;
 x sa température correspondante à la densité d' ;
 κ le rapport de sa capacité sous une pression constante, à sa capacité sous un volume constant (264); pour l'air, sa valeur est 1,375.

M. Gay-Lussac a observé, sur la chaleur des gaz, deux autres phénomènes qui sont plus difficiles à expliquer.

1^o. L'air qui s'échappe d'un vase en soufflant par une ouverture, sous une pression quelconque, ne change pas de température, quoiqu'il se dilate en sortant du vase;

2^o. Le vide étant fait dans un ballon, ou l'air étant seulement raréfié, la rentrée de l'air extérieur produit une élévation de température de plusieurs degrés.

Le premier de ces faits mérite toute l'attention des physiciens; il semble indiquer qu'il y a de la chaleur produite dans le souffle de l'air, et que cette chaleur est d'autant plus considérable que la différence de pression qui produit le souffle est plus grande, de telle manière que le réchauffement compense exactement le froid produit par l'expansion. Ainsi le second fait s'expliquerait par le premier.

Quelques physiciens avaient pensé que, si l'air s'échauffe en rentrant dans le vide, c'est que le vide est rempli de chaleur, non-seulement de chaleur rayonnante, mais encore d'une chaleur particulière et inhérente que l'air s'approprie lorsqu'il vient remplir l'espace. Cette conjecture semble tout-à-fait détruite par une belle expérience de M. Gay-Lussac. Si du calorique inhérent existait dans le vide, en réduisant l'espace subitement, la température du vide devrait augmenter, comme dans le cas où l'air y pénètre. Or, après avoir fait un baromètre à large colonne, dans la chambre duquel il met un thermomètre très sensible, M. Gay-Lussac fait alternativement monter et descendre le mercure par un mouvement très prompt, pour diminuer ou agrandir l'étendue du vide, et jamais ces changements ne sont accompagnés des moindres variations de température.

278. *De la percussion.* — Tout le monde sait qu'un métal s'échauffe lorsqu'on le bat sur l'enclume, ou lorsqu'on le comprime par le choc du balancier. Il était curieux d'observer si ce dégagement de chaleur est accompagné d'une réduction de volume permanente; car si le corps, un instant

refonlé sur lui-même, revenait à ses dimensions primitives, on ne verrait plus de raison à la production de la chaleur. Or, il résulte de quelques expériences de MM. Berthollet, Biot et Pictet, que le cuivre et l'argent, qui dégagent beaucoup de chaleur sous un premier coup de balancier, en dégagent moins sous le second coup, et moins encore sous le troisième. Enfin, quand ils sont tellement échauffés que leurs molécules ne puissent plus se rapprocher davantage d'une manière permanente, les chocs les plus violents ne produisent plus d'élévation de température. A ce point de condensation, ils sont analogues aux liquides; sans doute ils peuvent bien encore être comprimés, mais ils reviennent à l'instant; et la chaleur qu'ils dégagent dans cette compression instantanée est égale à celle qu'ils absorbent dans l'expansion qui la suit.

279. *Du frottement.* — Les métaux, le bois et tous les corps solides dégagent de la chaleur par le frottement : une roue prend feu lorsqu'elle tourne rapidement sur son essieu; les tourillons des roues, dans les machines à rotation, s'échauffent au point d'enflammer leurs supports; le bois lui-même s'allume en frottant sur du bois, et ce moyen de produire du feu est, comme on sait, le seul briquet des sauvages; deux morceaux de glace au-dessous de 0, frottés vivement, donnent assez de chaleur pour se fondre à leur surface. Tous ces phénomènes donnent lieu à une question importante, savoir : si les dégagements de chaleur qu'on observe dans le frottement résultent d'une compression permanente des corps frottés, ou si le mouvement de vibration imprimé à leurs molécules n'est pas lui-même une cause de chaleur. Il est difficile de faire sur ce point des expériences décisives. Cependant, les quantités de chaleur produites par le frottement et par la ségrégation des molécules sont souvent si considérables, que nous devons, avec Rumford et plusieurs physiciens, en attribuer au moins une partie aux mouvements de vibrations des molécules frottées. Parmi toutes les expériences qui favorisent cette opinion, nous nous contenterons de citer les suivantes.

Un alliage composé d'une partie de fer et de deux d'antimoine donne, sous la lime, de vives étincelles de feu; ainsi, les parcelles de limaille sont, par le frottement, portées à la température de la combustion. Dans le jeu du briquet ordinaire, les aspérités tranchantes du silex tracent un sillon dans l'acier, et en détachent des parcelles qui sont pareillement assez échauffées pour s'enflammer dans l'air, et pour tomber en globules arrondis par la fusion, et en partie brûlés. Au fond d'un canon de bronze, tourné verticalement et rempli d'eau, Rumford a fait jouer un foret très vivement et sous une grande pression; dans l'espace de deux heures, 4145 grains (poids anglais) de bronze ont été réduits en poudre, et la chaleur dégagée a été capable de faire passer 26 livres d'eau de 0 à 100°.

Cette chaleur ne provenait pas sans doute d'un changement de densité dans la masse de bronze, ou dans la limaille détachée, car cette limaille avait sensiblement la même capacité pour la chaleur que le bronze en masse.

280. *Des changements d'état.* — Nous avons vu que les changements d'état des corps donnent naissance à des absorptions et à des dégagements de chaleur dont il est facile d'avoir les mesures exactes; mais en éprouve de grandes difficultés lorsqu'on essaie d'expliquer ces phénomènes par les différentes capacités pour la chaleur que prennent les corps dans les divers états, de solide, de liquide ou de vapeur.

281. *Des actions moléculaires.* — Tout corps solide dégage de la chaleur à l'instant où il est mouillé par un liquide. Cette vérité générale résulte d'une série d'expériences que j'ai faites en 1822. Les liquides étaient l'eau, l'huile, l'alcool et l'éther acétique; les solides appartenaient au règne inorganique et au règne organique; ils avaient été réduits en poudre pour que l'effet fût plus sensible. Dans la multitude de ceux qui ont été essayés, il ne s'en est pas présenté un seul qui fit exception à la loi. Le plus souvent l'élévation de température n'était que de 1/4 ou 1/5 de degré; quelquefois elle s'élevait jusqu'à 10°. L'action moléculaire qui s'exerce dans ces circonstances, entre le solide et le liquide, n'est point une action chimique; elle ne s'exerce à la fois que sur une très faible partie de la masse, et l'on voit cependant quelle quantité de chaleur elle dégage; il faut bien que les molécules qui sont en jeu pour produire cette action se trouvent elles-mêmes à des températures très hautes. Ces effets sont, il me semble, la plus forte preuve que les vibrations moléculaires dégagent de la chaleur.

282. *De l'ignition spontanée.* — Nous appellerons ainsi le phénomène curieux découvert par Daubereiner, en 1823. Ce phénomène est le suivant : du platine, en fil très fin, en poudre, en feuille, ou en éponge, étant à la température ordinaire, si on le plonge dans un mélange d'hydrogène et d'air, pareillement à la température ordinaire, il suffit d'un instant pour qu'il y ait une vive ignition. Le platine devient chaud, rouge, rouge-blanc; l'hydrogène brûle, et la combustion continue tant qu'il y a des éléments combustibles en présence. Quelle est la cause qui détermine d'abord l'élévation de température? Les physiciens et les chimistes ont émis sur ce point des opinions très diverses; celle qui me semble la plus probable, c'est que le mélange gazeux exerce sur le métal divisé une action pareille à celle des liquides sur les corps qu'ils mouillent; que cette action moléculaire produit, aux points où elle s'exerce, une assez haute chaleur pour déterminer la combinaison de l'hydrogène avec l'oxygène, et que, la combustion une fois commencée, elle se continue d'elle-même par la chaleur qu'elle produit.

On fait ces expériences d'une manière commode avec la lampe de M. Gay-Lussac (Fig. 155); il suffit de présenter au courant d'hydrogène quelques fragments de platine divisé, et sans étuielle électrique on voit jaillir la flamme.

MM. Dulong et Thénard ont fait sur ce sujet de nombreuses expériences, desquelles il résulte :

1^o. Que le palladium, le rhodium et l'iridium se comportent comme le platine ;

2^o. Que l'osmium agit aussi, mais à 45°, et l'or à 120 ;

3^o. Que le charbon, le verre, la pierre ponce et la porcelaine agissent pareillement, mais à des températures voisines de 250° ;

4^o. Que tous ces corps perdent la propriété dont il s'agit par un trop long séjour dans l'air, mais qu'il suffit de les calciner pour la leur rendre.

283. *Des combinaisons.* — Les combinaisons chimiques sont, à la surface de la terre, la source la plus abondante de chaleur. Nous avons vu (272) comment on mesure les quantités qu'elles en fournissent ; mais la cause elle-même qui produit ces effets n'est pas aussi facile à découvrir. On a supposé long-temps que la chaleur dégagée ou absorbée dans les combinaisons provenait du changement d'état des éléments constituans, ou du rapport entre leurs capacités pour la chaleur et la capacité du composé ; mais ni les échanges d'état, ni les variations de capacité ne peuvent rendre compte des faits, et ce point est peut-être, dans toute la théorie de la chaleur des combinaisons, le seul qui soit bien établi.

284. *Des mélanges réfrigérans.* — Nous avons indiqué d'une manière générale (223) la cause du froid produit par les mélanges réfrigérans. Comme on peut avoir besoin de s'en servir dans une foule d'expériences, nous donnerons ici un tableau de ces mélanges, tiré de la Chimie de M. Thénard.

Tableau des mélanges réfrigérans.

MÉLANGES DE NEIGE ET DE SEL, DE D'ACIDE ÉTENDU, DE NITRATE.	TEMPÉRATURE DE SUBSISTANCE.
Neige. 1	de 0° à — 17,77
Sel marin. 1	
Hydro-chlorate de chaux. . 3	de 0 à — 17,77
Neige. 2	
Potasse. 4	de 0 à — 28,33
Neige. 3	
Neige. 1	de — 6,66 à — 51
Acide sulfurique étendu. . 1	
Neige ou glace pilée. . . 2	de — 17,77 à — 20,55
Sel marin. 1	
Neige et acide nitrique étendu. . 1	de — 17,77 à — 43,33
Hydro-chlorate de chaux. . 2	
Neige. 1	de — 17,77 à — 54,44
Neige ou glace pilée. . . 1	
Sel marin. 5	de — 20,55 à — 27,77
Hydro-chlorate d'ammoniaque et nitrate de potasse. 5	
Neige. 2	de — 23,33 à — 48,88
Acide sulfurique étendu. . 1	
Acide nitrique étendu. . 1	de — 27,77 à — 31,66
Neige ou glace pilée. . . 10	
Sel marin. 5	de — 27,77 à — 31,66
Nitrate d'ammoniaque. . 5	
Hydro-chlorate de chaux. . 3	de — 40 à — 58,33
Neige. 1	
Acide sulfurique étendu. . 10	de — 55,55 à — 68,33
Neige. 8	

285. Pour compléter l'énumération des sources de chaleur, nous devons indiquer encore la chaleur produite par l'électricité, et celle qui est produite par la lumière solaire ; nous parlerons de la première dans le livre suivant, et de la seconde dans la Météorologie.

APPENDICE.

CONSTRUCTION DES MACHINES A VAPEUR.

286. *Formation de la vapeur.* — La figure 229 représente une chaudière à vapeur sur son fourneau ; le feu en frappe le fond et les faces latérales, dans la plus grande hauteur possible ; car la quantité de vapeur produite dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la chaudière qui est immédiatement chauffée.

a est le tuyau par lequel s'échappe la vapeur pour aller produire son effet mécanique, comme nous le verrons plus loin.

x est la soupape du modérateur ; elle s'ouvre ou se ferme au moyen d'une tige extérieure, et modère la dépense.

La vapeur se formant sans cesse, il faut que l'eau arrive sans cesse dans la chaudière, et elle arrive d'elle-même par la disposition suivante :

s est un flotteur ; c'est une large pierre qui est sentinée à la surface de l'eau.

j est le fil de métal qui soutient le flotteur ; il sort de la chaudière par l'ouverture *j* qu'il remplit exactement, mais dans laquelle il peut glisser.

x est un levier ; à son extrémité *x* vient s'attacher le fil du flotteur, et à son extrémité *x* s'attache la tige de la soupape *x*.

m, soupape qui se lève quand le flotteur descend, et qui se ferme quand il remonte.

u, réservoir alimentaire. Quand la soupape *u* se lève, l'eau de ce réservoir descend dans le tuyau *u*.

u, tuyau alimentaire qui amène l'eau du réservoir jusqu'au fond de la chaudière.

o, cylindre de fer en forme de seuil, soutenu par la chaîne *r* qui passe sur deux poulies, et qui s'attache à un registre.

Si la pression de la vapeur est trop forte, elle refoule l'eau de la chaudière dans le tuyau alimentaire *u*, le seuil de fer *o* est soulevé, et le registre descend pour fermer plus ou moins l'ouverture de la cheminée, et modérer ainsi l'activité du feu.

s est une soupape de sûreté ; quand elle est soulevée par un excès de pression, la vapeur qu'elle dégage passe dans la cheminée par un tuyau latéral.

r sont deux robinets d'épreuve.

a est le manomètre qui marque la tension de la vapeur ; on le voit plus en grand au-dessus de la place qu'il occupe dans la figure 229.

c est le trou de l'homme ; c'est une ouverture par laquelle les ouvriers descendent dans la chaudière pour la réparer ou pour la nettoyer.

v est un robinet pour vider la chaudière.

Il y a des chaudières d'une tout autre forme.

Les figures 230 et 231 représentent la chaudière qu'on appelle le *bouilleur*, de Wolf ; elle se compose de huit cylindres en fonte (Fig. 231) disposés horizontalement et en croix au-dessous d'un grand cylindre horizontal *aa* (Fig. 230) auquel ils communiquent par des tubes verticaux. Le foyer est en *a*, et la flamme passe alternativement au-dessous d'un tuyau et au-dessus du suivant ; de cette manière on a une très grande surface en contact avec le feu. La vapeur formée dans les bouilleurs s'élève pour aller produire son effet mécanique ; et une pompe foulante refoule sans cesse de l'eau pour la remplacer.

287. *Action de la vapeur.* — La figure 238 représente une machine de Watt. La vapeur, formée comme nous venons de le dire, s'échappe de la chaudière par le modérateur, et vient se répandre dans le corps de pompe *c*, pour produire son effet mécanique sur le piston *r*. La vapeur arrive, agit et se détruit ; et tous ces phénomènes se produisent d'eux-mêmes avec une régularité merveilleuse que nous allons essayer de faire comprendre.

r est le piston. On voit dans la figure 232 le détail de sa construction. Les figures 233, 234 et 235 représentent des pistons de différentes espèces.

t, tige du piston.

c, cylindre ou corps de pompe, parfaitement rodé, dont le piston parcourt toute la longueur, alternativement, de haut en bas et de bas en haut. Il y a deux ouvertures *u* et *v* par chacune desquelles la vapeur peut entrer et sortir.

c', autre cylindre que nous appellerons *enveloppe*, parce qu'il enveloppe en effet le cylindre *c* ; il reste entre eux un espace annulaire dont on voit la largeur dans la figure ; c'est là que la vapeur arrive directement en sortant de la chaudière. Il n'y a point de communication immédiate entre l'espace annulaire et le cylindre *c*. (Voyez le plan, Fig. 236).

r est le tiroir, qui est représenté plus en grand dans les figures 236 et 237. On en voit le plan en *r*, Fig. 236. C'est un demi-cylindre vertical qui peut monter et descendre. Dans la figure 236, il est au-dessus de sa course, et il est en bas dans la figure 237. Il y a dans le tiroir des appendices en *u'* et en *v'*, Fig. 237, qu'il est important de considérer. Quand *u'* est au-dessous de l'ouverture *u*, Fig. 237, *u'* est au-dessous de l'ouverture *v* ; de même quand *v'* est au-dessus de l'ouverture *u*, *v'* est aussi au-dessus de l'ouverture *v*.

s, Fig. 236, 237, 238, est une soupape toujours

ouverte; c'est un modérateur par lequel la vapeur sort de l'espace annulaire pour passer au-dessus ou au-dessous du piston; au-dessus, quand le tiroir est au-dessus de sa course, Fig. 236, et au-dessous quand il est au bas de sa course, Fig. 237.

k, condenseur où la vapeur arrive par les conduits *e* et *e'*; l'eau échauffée par la condensation de la vapeur passe par la soupape *x*, et se trouve enlevée par la pompe d'épuisement *pp*.

Dans la position que représente la figure 238, le piston *v'* est en chemin pour descendre; le tiroir *r* est au-dessus de sa course, comme dans la figure 236; la vapeur arrivée de la chaudière dans l'espace annulaire passe par la soupape *s*, entre par l'ouverture *w*, se répand dans le cylindre *e* *c*, et presse le piston pour le forcer à descendre; en même temps l'ouverture *e* est libre, l'espace qui est au-dessous du piston communique au condenseur par les conduits *v'* et *v''*, et déjà toute la vapeur est condensée, et le piston peut descendre librement.

Quand le piston sera au bas de sa course, le tiroir descendra pour prendre la position de la figure 237; la communication sera fermée entre la soupape *s* et l'ouverture *w*; au contraire, elle sera établie entre la soupape *s* et l'ouverture *v*; ainsi, d'une part, la vapeur qui est au-dessus du piston ira se liquéfier dans le condenseur, en passant de *w* en *e'* et *v''*; et d'une autre part, la vapeur affluant par l'ouverture *e* fera, sans obstacle, remonter le piston jusqu'au-dessus de sa course.

Voilà comment s'établit le jeu alternatif du piston; et les pièces de la machine sont combinées avec tant d'art et de génie que, l'impulsion une fois donnée, la main de l'homme peut se reposer; chaque levier se lève à son tour, à l'instant où il doit agir, et tous ces mouvements, si nombreux, si variés, si compliqués, s'accomplissent d'eux-mêmes avec une admirable précision.

288. *Communication du mouvement.* — La force de la vapeur est maintenant dans la tige du piston; c'est là qu'il faut la prendre pour la faire passer jusqu'au lieu où elle doit agir, soit à l'extrémité de la roue du bateau à vapeur, soit sur le grain de blé qui doit être moulu, soit dans les cylindres qui doivent lamier les métaux, soit aux instruments tranchans qui doivent façonner le bois et faire des pièces de menuiserie, etc., etc.

MNO est un rectangle dont les angles sont mobiles, et qui s'attache à l'extrémité *t* du levier *ll'*.

ll', levier mobile autour de l'axe *x*.

r, bielle solide, qui s'attache à la manivelle *o*, et au moyen de laquelle l'axe *z*, qu'on appelle *arbre de couche*, reçoit un mouvement de rotation.

vv, volant destiné à régulariser le mouvement.

Le mouvement alternatif du piston pressé par la vapeur, se trouve ainsi transformé en un mouvement de rotation continu et uniforme, imprimé à l'arbre de couche; c'est là qu'on le prend ensuite pour le transmettre, par les moyens mécaniques ordinaires, jusqu'à la résistance qu'il doit vaincre.

LIVRE TROISIÈME.

DU MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

DE L'ACTION DES AIMANS SUR EUX-MÊMES ET SUR LES SUBSTANCES MAGNÉTIQUES.

290. On trouve dans la nature, et presque dans toutes les contrées de la terre, des substances minérales qui ont la propriété d'attirer le fer. Ces substances, quelle que soit leur forme ou leur composition, s'appellent des *aimans naturels*; autrefois on les appelait *pierres d'aimant*, parce qu'en effet elles offrent dans leur structure une apparence pierreuse plutôt qu'une apparence métallique. Il y a des aimans très faibles, c'est-à-dire que, sous un grand volume, ils n'exercent sur le fer qu'une attraction peu sensible; mis en contact avec de la fine limaille, ils peuvent à peine en soulever quelques parcelles : mais il s'en trouve quelquefois de très puissans, c'est-à-dire que, sous un volume de quelques pouces cubes, ils sont capables de tenir suspendues des masses de plus de cinquante ou même de plus de cent kilogrammes. Ces divers degrés dans l'énergie des aimans dépendent, comme nous le verrons plus tard, de quelque arrangement particulier de leurs molécules. Si la force était proportionnelle à la masse, on pourrait produire des phénomènes d'une intensité prodigieuse, puisqu'il y a des aimans qui n'ont pas seulement quelques pieds cubes en volume, on quelques quintaux en poids, mais qui composent d'immenses montagnes à la surface de la terre.

Pour étudier la force attractive qui s'exerce entre le fer et l'aimant, on peut plonger un aimant, par une de ses extrémités, dans de la limaille ou dans de la tournure de fer; alors s'il est un peu énergique, on voit les parcelles de métal s'attacher à sa surface, et s'attacher les unes aux autres en formant une sorte de chevelure de plusieurs lignes de longueur. Cette adhérence des particules entre elles et leur arrangement est un phénomène digne de remarque, sur lequel nous reviendrons dans la suite; pour le moment nous nous contenterons de le regarder comme une simple preuve d'attraction. L'en peut ainsi présenter à l'aimant, suivant son degré de force, des morceaux de fer plus ou moins volumineux; à peine en sent-ils approchés à quelques millimètres de distance qu'on les sent devenir

plus légers; ils sont vivement entraînés, et se précipitent sur la surface pour y rester suspendus; il faut ensuite un effort plus ou moins considérable pour les en arracher. On peut encore suspendre une petite balle de fer à un fil flexible, et en approcher peu à peu la surface de l'aimant : de cette manière on reconnaît quelques caractères essentiels de sa force attractive; il est facile de constater, 1^o qu'elle s'exerce à distance; 2^o qu'elle s'exerce au travers de l'air, au travers du vide et au travers de tous les corps quels qu'ils soient, pourvu qu'ils ne soient pas du fer; 3^o qu'elle diminue à mesure que la distance augmente.

Toutes les attractions étant réciproques, on doit conclure que si l'aimant attire le fer, il est attiré par lui avec la même énergie et suivant les mêmes lois. Cette vérité nécessaire peut, au reste, se vérifier directement par des expériences inverses des précédentes, en suspendant l'aimant pour le rendre mobile, et en faisant agir sur lui des morceaux de fer à diverses distances.

Cette force attractive étant distincte de toutes les autres forces naturelles, on lui donne un nom particulier, on l'appelle *force magnétique*, du mot *μάγνηξ*, qui était chez les Grecs le nom de la pierre d'aimant; car les anciens avaient quelque connaissance de ses propriétés; Platon en parle dans plusieurs de ses dialogues, et il faut remonter jusqu'au temps du Pythagore pour recueillir les premières notions qui nous aient été transmises sur ce sujet. Nous verrons bientôt que la force magnétique peut être attribuée à une substance analogue à celle du calorique, ou à un fluide particulier existant comme le calorique dans les intervalles qui séparent les molécules de la matière pondérable; ce fluide est ce que nous appelons le *fluide magnétique*, ou simplement le *magnétisme*, en désignant ainsi par le même mot et l'agent qui produit les phénomènes et la science qui a pour objet de les découvrir, de les comparer et de les expliquer ou de les rapporter à un même principe.

Toute force attractive ayant deux sièges on deux

termes, le corps attirant et le corps attiré, nous allons d'abord étudier la force magnétique dans l'aimant où elle réside et d'où elle semble tirer sa première origine.

291. *Tout aimant a une ligne moyenne et deux pôles.* — Le fer semble être à l'égard de l'aimant ce que sont les corps pesans par rapport au globe de la terre : la masse du globe attire les corps dans tous les sens et les presse sur sa surface; essayons de voir s'il en est de même de l'aimant, et si de tous les points de son contour il exerce une action pareille pour solliciter les parcelles de fer et pour les attirer vers son centre. Reprenons pour cela le pendule magnétique, c'est-à-dire la petite balle on le petit fil de fer suspendue à un fil flexible. En tenant l'aimant à la même distance du pendule, on reconnaît bientôt que certains points de sa surface lui impriment une grande déviation, tandis que d'autres points ne produisent qu'une déviation nulle ou insensible; il y a surtout deux régions opposées qui montrent une action très vive, et c'est sur l'intervalle qui les sépare que l'on aperçoit le moindre effet. On est conduit au même résultat, soit qu'on emploie pour cette expérience un aimant naturel avec sa forme irrégulière, ou un aimant artificiel ayant la forme d'un cylindre ou d'un prisme allongé. Dans ce dernier cas la différence est plus frappante, et l'on voit sans peine que les sections transversales qui avoisinent le milieu de l'aimant n'agissent point sur le pendule, tandis que les parties extrêmes agissent avec une grande force. On peut donc sur la surface d'un aimant, et vers le milieu de sa longueur, tracer une ligne dont les points n'exercent aucune action attractive; c'est cette ligne que nous appelons *ligne neutre* ou *ligne moyenne*. Elle partage l'aimant en deux parties, que nous appelons les deux *pôles* de l'aimant. Ce même mot *pôle* sera pris encore dans deux autres acceptions différentes; nous nous en servirons pour désigner seulement les parties de la surface les plus éloignées de la ligne moyenne, et sur lesquelles l'attraction est la plus forte; et nous nous en servirons aussi pour désigner un point idéal qui sera conçu dans l'intérieur de l'aimant, à peu près comme le centre de gravité est conçu dans l'intérieur des corps, ou dans la masse du globe terrestre qui les attire; car une parcelle de fer n'est pas sollicitée seulement par le point de l'aimant auquel elle vient s'attacher, elle est sollicitée par toute la portion qui est d'un même côté de la ligne moyenne, et la résultante de toutes ces attractions est appliquée en un certain point que nous appellerons le pôle de cette portion de l'aimant. Il sera toujours facile de distinguer celle de ces trois exceptions dans laquelle nous entendons que le mot *pôle* est employé. Dans tous les cas, on voit qu'un aimant a une ligne moyenne et deux pôles.

Cette proposition fondamentale peut encore être démontrée par d'autres expériences plus faciles et plus décisives. Si l'on roule un aimant dans de la

limaille de fer, il se couvre de filamens plus ou moins allongés, qui montrent à l'œil l'inégale attraction des différens points de sa surface. Cet arrangement est représenté (Fig. 240) pour un aimant naturel, et (Fig. 241) pour un aimant artificiel. Aux extrémités x et x' les filamens de limaille sont très longs et dressés perpendiculairement à la surface; sur les sections moins extrêmes ils deviennent plus courts, et commencent à s'incliner, comme s'ils fuyaient les extrémités pour se rapprocher du milieu; enfin sur la section moyenne mm' aucune parcelle de limaille ne reste attachée : les filamens qu'en y voit prennent naissance de part et d'autre de cette ligne, et semblent la franchir pour se joindre et s'appliquer sur la surface de l'aimant. mm' est la ligne moyenne, les deux moitiés x et x' sont les pôles de l'aimant, cette dénomination, comme nous venons de le dire, s'appliquant quelquefois aux deux extrémités x et x' , où l'action est la plus forte, et d'autres fois aux deux points p et p' , que l'on peut regarder comme les centres de l'attraction.

On reproduit des effets analogues, en mettant sur un aimant une feuille de carton lisse, sur laquelle on laisse tomber de la fine limaille avec un petit tamis. Par des chocs légers que l'on imprime au carton, la limaille s'arrange en courbes régulières qui sont représentées Fig. 244. L'aimant est indiqué par des lignes ponctuées; la ligne moyenne est en mm' . Cette expérience fait voir, mieux encore que les précédentes, comment les filets de limaille, partant des deux côtés de la ligne moyenne, passent sur cette ligne pour se rejoindre; elle offre aussi une preuve que l'attraction de l'aimant s'exerce au travers de la substance du carton.

Les aimans pouvant être brisés ou coupés suivant la ligne moyenne, il semble, au premier coup d'œil, que les deux portions qui en résultent doivent nécessairement échapper à la proposition dont il s'agit. On pourrait bien supposer que, séparées l'une de l'autre, elles perdent leur propriété magnétique; mais on n'imagine pas que, si elles en conservent quelque chose, elles puissent avoir une ligne moyenne et deux pôles. L'expérience en est facile à faire : nous verrons plus loin qu'avec de l'acier trempé très dur on peut faire des aimans qui cassent comme du verre. Prenons un aimant de cette espèce; brisons-le suivant la ligne moyenne, et plongeons dans la limaille chacune de ses moitiés pour observer les modifications qu'elles ont éprouvées. Nous trouverons, avec quelque surprise, que chacune d'elles est un aimant tout entier ayant ses deux pôles, et sa ligne moyenne au milieu. En les brisant de nouveau, les moitiés de ces moitiés présenteront les mêmes phénomènes, et l'on pourra pousser ses subdivisions aussi loin que l'on voudra, sans jamais trouver de limite à cette propriété : les derniers fragmens seront des aimans entiers, offrant, comme l'aimant primitif, une ligne moyenne et deux pôles. Nous verrons plus tard la raison de

ce fait ; mais il est bon de l'indiquer ici pour faire comprendre toute la généralité du principe dont il s'agit, et pour montrer ainsi l'impossibilité absolue où nous sommes de former un aimant qui n'ait qu'un seul pôle.

292. *Les pôles de même nom se repoussent, et ceux de noms contraires s'attirent.* — La Figure 245 représente un aimant suspendu horizontalement, au moyen d'un échappe de papier ou de métal et d'un fil sans torsion ; à chacun de ses pôles α et β on présente successivement le même pôle d'un autre aimant pareil ; le pôle α est attiré, le pôle β est repoussé ; et l'on dit que ces deux pôles α et β sont de noms contraires, parce qu'ils agissent en sens contraire sur le même pôle qui leur est présenté. Si les deux pôles de ce premier aimant sont de noms contraires, il est naturel de supposer que ceux du deuxième aimant sont pareillement de noms contraires, et qu'il en est de même de tous les aimants possibles. En effet, si l'on retourne ce deuxième aimant pour le faire agir par son autre pôle sur l'aimant suspendu, on reconnaît de suite que les pôles α et β éprouvent maintenant des effets contraires : α est repoussé et β attiré ; donc les deux pôles de l'aimant libre que l'on tient à la main sont aussi de noms contraires, puisque l'un attire ce que l'autre repousse, et vice versa. Tout aimant libre présente le même phénomène. Nous appellerons *pôles de même nom* les pôles de différents aimants qui agissent de la même manière, soit sur le pôle α , soit sur le pôle β de l'aimant suspendu. Ces pôles une fois marqués sur plusieurs aimants afin de les bien reconnaître, que l'on suspende l'un de ces aimants pour faire agir les autres sur lui, et l'on verra que tous les pôles de même nom se repoussent, tandis que tous les autres qui sont de noms contraires s'attirent.

Ainsi de part et d'autre de la ligne moyenne dans les deux moitiés d'un aimant résident deux forces, qui d'abord nous semblaient identiques, parce qu'elles agissaient de la même manière sur le fer, et qui sont en réalité deux forces opposées, puisqu'elles agissent en sens contraire sur les aimants, l'une attirant ce que l'autre repousse. La ligne moyenne est la limite de ces deux forces antagonistes ; elle est le passage de l'une à l'autre, et c'est là ce qui rend raison de la neutralité qu'elle conserve. Ces deux forces tendent sans cesse à se neutraliser ou à se détruire, et si l'on pouvait, par exemple, dans un aimant donné, incorporer un autre aimant de mêmes dimensions et de même force, de manière que les pôles de noms contraires se correspondissent ; au lieu de deux aimants égaux l'on n'aurait plus qu'une masse inerte entièrement dépourvue de ses facultés magnétiques. Par la simple superposition la destruction n'est pas complète, parce que les diverses parties de l'un des aimants n'agissent pas à la même distance que les parties homologues de l'autre ; mais du moins il y a dans ce cas une réduction très sensible dans l'intensité

de la force, c'est ce que l'on démontre par l'expérience suivante. Un aimant horizontal $\alpha \beta$ (Fig. 247) porte vers son extrémité une masse de fer γ dont le poids est à peu près tout ce qu'il peut porter ; on approche un autre aimant de même force, de manière que le pôle α corresponde au pôle de nom contraire γ ; dès que la distance est assez petite la masse γ se détache et tombe ; le système des deux aimants ne peut plus porter ce que l'un d'eux portait facilement, parce que les actions des deux pôles contraires tendent à se neutraliser. Il est inutile de remarquer que si les pôles du second aimant correspondaient aux pôles de même nom du premier, non-seulement la masse γ ne se détacherait pas, mais on pourrait en augmenter le poids, et presque le doubler sans qu'elle tombât, parce qu'alors les pôles de même nom exerçant des actions conspirantes, leur effet total est, à quelques modifications près, la somme de leurs effets particuliers.

293. *Les actions magnétiques peuvent être attribuées à un fluide particulier.* — Lorsqu'on cherche à remonter à l'origine des forces qui produisent les phénomènes magnétiques, on reconnaît bientôt qu'elles ne sont pas, comme la pesanteur, une propriété inhérente à la matière pondérable. L'analyse chimique a démontré que les aimants naturels ne sont que des oxydes de fer ou des mélanges d'oxydes de fer à différents degrés de saturation ; l'oxygène et le fer sont donc les seuls éléments pondérables qui entrent dans la composition de ces corps singuliers. Or, ni l'un ni l'autre de ces éléments n'ayant la propriété permanente d'exercer des actions pareilles aux actions magnétiques, il est peu probable que leurs molécules prennent en se combinant des propriétés essentielles qu'elles n'avaient pas avant leur combinaison ; car dans la matière pondérable on n'observe jamais que la forme, l'arrangement ou la disposition des molécules donne naissance à des forces nouvelles qui puissent s'exercer à des distances sensibles. D'une autre part, les forces inhérentes à la matière pondérable peuvent bien être augmentées ou diminuées, ou modifiées de mille manières, mais elles ne peuvent jamais se détruire ou disparaître ; tandis que dans les aimants les forces magnétiques ne paraissent qu'accidentellement. On en donne la preuve en faisant chauffer un aimant jusqu'à la température rouge ; par cette opération il ne perd rien de ses éléments matériels ; et cependant il perd toutes ses propriétés magnétiques. Après le refroidissement, il est, en ce qui tient à la matière, tout-à-fait ce qu'il était auparavant ; mais en ce qui tient au magnétisme, il n'est plus rien absolument, car il n'exerce plus aucune action sur le fer. Il y a même plus, on peut lui rendre ses propriétés magnétiques sans rien lui donner et sans rien lui ôter de pondérable. C'est par ces raisons, et par d'autres encore, résultant de l'ensemble des phénomènes, que l'on est conduit à regarder le magnétisme comme un fluide d'une espèce parti-

culière, répandu dans la masse pesante de l'oxide de fer qui constitue l'aimant. Et puisque nous avons reconnu qu'il y a deux forces magnétiques opposées, nous devons conclure aussi qu'il y a deux fluides contraires, l'un qui *prédomine* dans l'un des pôles, et l'autre qui *prédomine* dans l'autre pôle. Dans tous les aimans, les pôles de même nom auront le même fluide prédominant; et comme ils se repoussent, nous en concluons que chaque fluide se repousse lui-même: les pôles de nom contraire auront des fluides différens; et comme ils s'attirent, nous en concluons que l'un des fluides attire l'autre. Ainsi nous sommes conduits à ce résultat définitif qu'il existe deux fluides magnétiques, dont chacun se repousse et attire l'autre.

Ces fluides doivent parcellairement exister dans le fer; car s'ils sont distincts de la matière pondérable, on peut présumer que l'action qui s'exerce sur le fer ne s'exerce pas sur les molécules matérielles du fer; mais bien sur les fluides magnétiques contenus dans les intervalles de ces molécules. Nous avons donc quelque raison de chercher le fluide magnétique dans le fer, et de tenter les expériences qui peuvent nous faire découvrir son mode d'existence.

294. *Sous l'influence de l'aimant le fer devient lui-même un aimant.* — Pour démontrer cette propriété du fer, on peut disposer l'expérience comme elle est indiquée dans la figure 245. *r* est un cylindre de fer soutenu par un aimant *as*; à son extrémité inférieure on présente de la limaille, qui s'y attache en forme de houppes, et qui reste suspendue aussi long-temps que le petit cylindre est lui-même suspendu à l'aimant; mais si on l'en détache, à l'instant toute la limaille tombe, et l'on n'observe plus aucune force attractive. Ce n'est pas la force de l'aimant qui agit à distance sur la limaille et la maintient suspendue; car si le petit cylindre n'était pas de fer, le phénomène ne se produirait pas, et l'on peut encore bien mieux s'en convaincre, en observant 1^o que les filets de limaille diminuent de longueur, à partir de l'extrémité du petit cylindre; 2^o qu'il y a un point vers la partie supérieure où ils ne peuvent plus s'attacher, ce qui forme la ligne moyenne; 3^o qu'au-dessus de ce point ils s'attachent de nouveau, et se dirigent en sens contraire. Ainsi le petit cylindre est bien véritablement un aimant, puisqu'il attire la limaille, et qu'il a une ligne moyenne et deux pôles, seulement sa ligne moyenne n'est pas au milieu.

Au lieu d'offrir de la limaille au cylindre suspendu, on lui donne un autre cylindre pareil, et il le peut porter (Fig. 246); à celui-ci on en donne un troisième, qu'il porte pareillement; à celui-ci un quatrième, et l'on forme ainsi une sorte de chaîne dont l'aimant est comme le principe et le premier anneau; si bien que le premier anneau manquant; toute la chaîne tombe et se brise, les autres anneaux n'ayant plus d'action pour se hier l'un à l'autre.

On peut démontrer la même chose, en mettant le petit cylindre de fer dans le prolongement du barreau, sur une feuille de papier blanc (Fig. 247). La limaille que l'on projette sur son contour s'y arrange régulièrement, et laisse voir en *mm'* une ligne moyenne, qui sépare les deux actions contraires dont le cylindre de fer est maintenant animé; et dès l'instant que l'on retire le barreau, la limaille n'a plus aucune tendance, ni à s'arranger ni à conserver son arrangement primitif; ce qui prouve assez que le fer perd ses propriétés dès qu'il n'est plus sous l'influence de l'aimant. En modifiant cette expérience, on peut prouver que ce n'est pas seulement au contact que le fer reçoit de l'aimant la propriété magnétique, mais qu'il la reçoit à distance, comme on le voit dans la figure 243.

Ainsi le fer contient, comme l'aimant, les deux fluides magnétiques; mais ces deux fluides y sont combinés, c'est-à-dire neutralisés l'un par l'autre. C'est pourquoi le fer n'agit pas magnétiquement sur le fer, car ce qui est attiré par l'un des fluides est repoussé par l'autre avec une force égale, et l'action définitive est tout-à-fait nulle. Au contraire, quand il est soumis à l'action de l'aimant, ses deux fluides sont décomposés; l'un est attiré, l'autre repoussé; une séparation s'opère entre eux; le premier afflue du côté de l'aimant, l'autre afflue à l'extrémité opposée de la masse de fer, et là il devient prédominant au point d'attirer la limaille qu'on lui présente. Voilà comment nous concevons que l'état naturel du fer ne soit autre chose qu'un état de combinaison ou de neutralisation de ses deux fluides magnétiques, et que son état magnétique résulte d'une séparation plus ou moins complète des deux fluides par l'attraction et la répulsion qu'ils éprouvent de la part de l'aimant. Cependant le phénomène de décomposition des fluides magnétiques pouvant se produire de plusieurs manières, nous devons chercher à reconnaître si ces fluides éprouvent réellement dans la substance du fer un mouvement de translation par lequel ils passent d'une extrémité à l'autre de sa masse, ou s'ils n'éprouvent qu'un déplacement moléculaire.

295. *Le fluide magnétique ne passe pas de l'aimant ou fer, ni même d'une molécule de fer à la molécule voisine.* — Avec un aimant on peut aimanter des morceaux de fer aussi long-temps et aussi souvent que l'on veut, sans qu'il perde rien de sa propriété attractive; donc par cette opération l'aimant ne perd pas son fluide pour le donner au fer, puisqu'à la longue il finirait par s'épuiser. De plus, on peut remarquer qu'un morceau de fer qui devient aimant pendant tout le temps qu'il touche un véritable aimant, ne conserve, quand on l'en sépare, aucune trace de ses propriétés magnétiques: donc il ne lui a rien pris, puisqu'il n'a rien gardé. Enfin, et cette observation est encore plus décisive, le cylindre de fer qui touche l'aimant ayant une ligne moyenne et deux pôles, c'est une preuve

qu'il possède les deux fluides, et sans doute il n'en pourrait recevoir qu'un seul de l'aimant si c'était l'aimant qui le lui donnât. Ainsi le fer possède lui-même les deux fluides magnétiques; ils sont à l'état neutre dans sa substance, et la présence de l'aimant les sépare, en attirant l'un et repoussant l'autre; voilà pourquoi le fer est attiré indifféremment par les deux pôles, tandis qu'il devrait être repoussé par tous deux s'il partageait leur fluide. Il en est de même de tous les corps magnétiques, considérés dans leur état naturel; ils ne sont magnétiques que parce qu'ils possèdent les deux fluides, et ils ne sont à l'état naturel que parce que les deux fluides sont neutralisés ou dissimulés l'un par l'autre.

Un caractère essentiel du magnétisme c'est qu'il n'est pas transmissible, et ne peut par aucune cause sortir du corps qui le contient. On pourrait penser que du moins il est dans le corps comme dans un vase fermé de toutes parts, et que s'il ne peut se transmettre au dehors, il peut se déplacer au dedans, et se porter tantôt dans un point, tantôt dans l'autre, et s'y accumuler, suivant les forces qui le sollicitent. Cependant nous allons voir qu'il n'en est pas ainsi, car si l'on met un fil de fer en contact avec un aimant, et que l'on coupe l'extrémité pendant que les fluides sont décomposés, l'un paraissant en haut et l'autre en bas, on ne retrouve pas la moindre trace de magnétisme dans la partie que l'on détache. Les apparences sont donc trompeuses, et il faut bien se garder de croire que le fluide magnétique puisse être décomposé comme le fluide électrique, et qu'il puisse voyager d'un bout à l'autre du fil qui le contient. Ce résultat semble un paradoxe inexplicable; mais, avec un peu d'attention, l'on peut concevoir, comme nous le démontrerons, que la décomposition magnétique a lieu dans chaque molécule séparément, que c'est dans cette petite étendue que le fluide peut se mouvoir, de telle sorte qu'il faudrait couper en deux une molécule elle-même, pour pouvoir parvenir à isoler l'un de l'autre les deux fluides magnétiques. Voilà le principe des considérations par lesquelles nous pourrions expliquer le phénomène dont il s'agit, ainsi que le phénomène des aimans que l'on brise, et dont chaque moitié devient à l'instant un aimant entier.

200. *L'acier prend toutes les propriétés magnétiques des aimans.* — La limaille d'acier n'est guère moins attirable que la limaille de fer; elle s'attache aux aimans, et forme aussi de petits filets ou de petites houppes d'une longueur très sensible. Les fils d'acier qui n'ont d'épaisseur que quelques fractions de millimètre sont encore assez comparables aux fils de fer de mêmes dimensions; seulement ils sont plus lents à recevoir l'action magnétique. Mais les morceaux d'acier d'un volume un peu considérable, et surtout les morceaux d'acier fortement trempé, présentent des propriétés tout-à-fait distinctes de celles du fer, car ils paraissent d'abord ne recevoir des aimans aucune espèce d'influence.

On s'en assure en essayant de répéter, avec de petits cylindres d'acier trempé, l'expérience qui est indiquée dans la figure 249. Le premier cylindre ne pourra pas s'attacher à l'aimant, et il sera impossible de former avec l'acier la chaîne magnétique qui se forme si facilement avec le fer. Cependant les petits fragmens d'acier étant attirables, il est naturel de supposer qu'en prenant du volume cette substance ne perd pas complètement sa sensibilité magnétique, et qu'il suffit seulement de quelques précautions pour la rendre apparente autant qu'elle doit l'être. En effet, que l'on mette l'acier en contact avec l'aimant, et que l'on maintienne ce contact pendant un quart d'heure ou une demi-heure, on observe alors un phénomène remarquable: ce corps, qui semblait au premier instant si insensible au magnétisme, devient magnétique avec le temps; il prend de la force de plus en plus, et à la fin il est attiré aussi puissamment que le fer. On peut même par un autre moyen suppléer au temps qui paraît nécessaire pour développer sa force; ce moyen consiste à exercer plusieurs touches, c'est-à-dire, plusieurs frictions dans le même sens, sur toute la longueur du morceau d'acier, soit en faisant passer sur l'aimant, soit en faisant passer l'aimant sur lui. Par exemple, en traitant de la sorte les petits cylindres dont nous parlions tout à l'heure, et sur lesquels l'aimant n'avait pas de prise, on les voit, après quelques frictions, s'attacher à sa surface, s'attacher l'un à l'autre, et former enfin une chaîne magnétique qui se prolonge comme celle des cylindres de fer. Le premier caractère de l'acier trempé est donc d'exiger, pour devenir magnétique, ou un contact prolongé avec un aimant, ou des frictions répétées. Un second caractère, très digne de remarque, c'est qu'après ces opérations il conserve *pour toujours* le magnétisme qu'il a pris. Pour preuve de cette vérité, il suffit de router dans la limaille l'acier qui a été touché par un aimant: on y reconnaît alors une ligne moyenne et deux pôles, et, en un mot, toutes les propriétés qui distinguent les aimans; qu'on l'essaie encore après un jour ou un mois, ou même après des années, on verra qu'il n'a rien perdu de sa force; enfin que l'on mette en présence, pour les faire agir l'un sur l'autre, les pôles de même nom de ces aimans artificiels, ou leurs pôles de nom contraire, on verra que les premiers se repoussent et que les autres s'attirent exactement comme le font les pôles des aimans naturels.

Du premier caractère que présente l'acier, c'est-à-dire de la lenteur avec laquelle il cède à l'action des aimans, on conclut qu'il y a dans sa substance une force ou plutôt une sorte de résistance qui s'oppose à la séparation immédiate de ses fluides magnétiques, et, cette force, on l'appelle *force coercitive*. Du second caractère qu'il présente, c'est-à-dire de la faculté avec laquelle il conserve le magnétisme qu'il a pu recevoir, on conclut qu'il y a aussi dans sa substance une force ou une résis-

tance qui s'oppose à la réunion des deux fluides séparés; car les fluides contraires s'attirent, et tendent sans cesse à se recomposer ou à se neutraliser; et s'il n'y avait pas une force qui s'y opposât, les deux fluides se recomposeraient en effet, et l'acier retomberait à l'état naturel dès qu'il serait séparé de l'aimant qui exerce sur lui son action décomposante. Cette résistance à la recombinaison des fluides s'appelle encore *force coercitive*, comme la résistance à leur séparation. Ainsi l'on admet, sans toutefois en avoir une preuve certaine, que, si les fluides magnétiques ont, dans certains corps, quelque résistance, quelque frottement, on en général quelques obstacles à vaincre pour s'écarter l'un de l'autre, ils doivent rencontrer les mêmes obstacles pour revenir l'un à l'autre et reprendre leur place naturelle.

La force coercitive est très différente dans les aciers de différente espèce, et elle est plus variable encore par les modifications particulières que reçoit cette substance que par les proportions chimiques des éléments qui la constituent. On sait que l'acier n'est autre chose que du fer auquel se trouve combinée une très faible quantité de charbon, et le plus souvent aussi quelques atomes de silicium. D'après les analyses les plus exactes, il paraît que le charbon n'y entre que pour six à sept millièmes du poids total.

La qualité du fer et les petites variations que peuvent éprouver les proportions de carbone ont sans doute une influence très marquée sur les propriétés de l'acier. Mais tout le monde sait qu'avec une même pièce de ce métal on peut faire des outils tranchans de toute espèce, des ressorts très élastiques, des burins à graver ou des coins à frapper la monnaie, qui sont cassant comme du verre. Toutes ces propriétés si diverses, et en apparence si contradictoires dans un corps qui est chimiquement le même, ne dépendent que d'un certain arrangement des molécules, qui est déterminé par des opérations mécaniques ou par l'influence de la chaleur. A chaque arrangement moléculaire, et aussi à chaque température, correspondent des propriétés magnétiques différentes: voilà pourquoi la force coercitive est si variable dans l'acier. Nous ferons plus loin une étude particulière de ces modifications, et, pour cet instant, nous nous contenterons de remarquer, 1^o que l'acier qui a reçu la trempe la plus rude, est en général celui qui a la force coercitive la plus grande; 2^o que la trempe des ressorts donne déjà une force coercitive en vertu de laquelle l'acier conserve très bien son magnétisme; 3^o qu'en général le fer prend lui-même une force coercitive lorsqu'il est battu, tordu, écroui ou tourné en différens sens. Mais, pour le distinguer, nous appelons *fer doux* celui qui n'a point de force coercitive.

Il résulte de ce qui précède que nous pouvons fabriquer des aimans tout-à-fait pareils aux aimans naturels, et nous en tirerons cet avantage, que,

étant maîtres de varier à volonté les dimensions et les formes, nous pourrions les approprier à nos recherches. Les aimans artificiels prennent des noms différens. Une *aiguille aimantée* (Fig. 261) a en général la forme d'un lossange. Elle est destinée, tantôt à être posée sur un pivot d'acier très aigu, au moyen d'une chape en agate, tantôt à être suspendue par un fil de soie d'un seul brin, ou par un assemblage de fils de soie sans torsion. Quelquefois l'aiguille aimantée est un simple fil d'acier, un cylindre ou un prisme allongé. Quand les dimensions de l'aiguille sont un peu considérables, soit en longueur, soit en épaisseur, il ne suffit plus de la passer sur l'aimant pour lui donner tout le magnétisme qu'elle peut recevoir, il faut recourir alors à des procédés particuliers que nous ferons connaître en détail dans le chapitre de l'aimantation.

Une aiguille de grandes dimensions s'appelle un *barreau aimanté*, ou simplement un *barreau*.

La réunion de plusieurs aiguilles ou de plusieurs lames aimantées ayant toutes les pôles du même nom tournés dans le même sens, forme un *faisceau aimanté* ou un *faisceau magnétique*.

297. *Des diverses substances magnétiques et de leur force coercitive.* — Le fer et l'acier ne sont pas, avec l'aimant, les seules substances magnétiques que nous connaissions; le fer est un métal et un corps simple chimiquement, l'acier est un composé de fer et de carbone, l'aimant un composé de fer et d'oxygène; et puisqu'on ne trouve aucune trace de magnétisme ni dans le carbone ni dans l'oxygène, on est porté à croire 1^o que le fluide magnétique tient à la substance du fer, et 2^o qu'il est emporté avec les atomes de ce métal dans toutes les combinaisons chimiques auxquelles ils sont soumis. D'après cela, on peut s'attendre à retrouver des propriétés magnétiques plus ou moins apparentes dans toutes les substances ferrugineuses, soit que le fer y entre comme principe accidentel par voie de mélange, soit qu'il y entre comme principe essentiel et par voie de combinaison. En effet, la fonte, la plombagine, les oxydes et les sulfures de fer, exercent une action plus ou moins sensible sur l'aiguille aimantée. Nous verrons, dans l'un des chapitres suivans, les moyens délicats par lesquels on découvre ces actions quand elles sont trop faibles pour mettre en mouvement l'aiguille ordinaire. Il paraît cependant que certains corps sont bien plus efficaces que d'autres pour atténuer les propriétés magnétiques du fer, en se combinant avec lui.

Le *nickel*, qui a été découvert par Cronstedt vers 1750, et obtenu à l'état de pureté par Bergman en 1775, et le *cobalt*, qui fut obtenu par Brandt dès 1733, sont deux autres métaux ayant des propriétés magnétiques analogues à celles du fer. On a cru long-temps que le magnétisme de ces corps pouvait tenir à la présence du fer; mais les travaux de plusieurs chimistes, et particulière-

ment de Sage et de M. Thénard, ne laissent aucun doute sur ce sujet. Le nickel et le cobalt sont des corps simples; ils peuvent être purifiés au point de ne contenir que des traces des autres métaux auxquels ils sont naturellement unis, et il est certain que ces atomes étrangers sont tout-à-fait incapables de leur donner les propriétés magnétiques qu'ils manifestent. Voilà donc deux autres substances élémentaires contenant, comme la substance du fer, les deux fluides magnétiques combinés. Ces substances peuvent aussi, suivant les préparations qu'elles ont reçues, suivant les actions mécaniques qu'elles ont subies, et suivant les éléments étrangers qu'elles contiennent, se présenter comme le fer doux, sans aucune force coercitive, ou comme le fer écroui et l'acier, avec des forces coercitives plus ou moins marquées.

Le chrome et le manganèse sont encore deux autres métaux magnétiques; mais le manganèse n'est magnétique, comme nous le verrons plus tard, que lorsqu'il est refroidi à 15 ou 20° au-dessous de zéro.

298. *Moyen de reconnaître si une substance est simplement magnétique ou si elle est aimantée*. — Un corps aimanté a nécessairement des pôles différents car nous avons déjà dit (291) qu'il est impossible d'isoler un des pôles d'un aimant, et par conséquent d'isoler un des fluides; les pôles de son contraire ayant une action contraire sur le même pôle d'une aiguille aimantée, il suffira donc de présenter tous les points d'un corps au même pôle d'une aiguille pour reconnaître son état. Si l'action est toujours nulle, le corps n'a point de magnétisme sensible; si elle est toujours attractive, le corps est simplement magnétique; si elle est attractive pour quelques points et ré-

pulsive pour d'autres, le corps est aimanté, il a deux pôles contraires et une ligne moyenne dont on peut trouver la trace.

Il arrive quelquefois qu'un même corps présente plus de deux pôles; alors on dit qu'il a des *points conséquens*. Par exemple, l'aiguille représentée dans la figure 254 offre deux points conséquens: l'un en a, l'autre en b. Pour en reconnaître la présence, il suffit de la faire agir sur une petite aiguille d'éprouve comme celle de la figure 251. Celle-ci étant horizontale, on approche l'autre aiguille verticalement, et on la fait monter ou descendre de manière que tous ses points passent successivement devant le même pôle de l'aiguille mobile: s'il n'y a pas de point conséquent, l'on n'observe qu'une attraction et une répulsion; s'il y a un point conséquent, on observe deux alternatives. Par exemple, une attraction d'abord, puis une répulsion, puis une autre attraction: s'il y a deux points conséquens, on observe trois alternatives, etc., car, dans un aimant qui présente des points conséquens, chaque pôle touche toujours à un pôle de son contraire, et les alternatives d'attraction et de répulsion se suivent régulièrement.

Les points conséquens peuvent encore être rendus visibles, soit en plongeant l'aimant dans la limaille, soit en le mettant sous une feuille de carton ou de papier sur laquelle on tamise de la limaille très fine. C'est la seconde de ces expériences qui est représentée dans la figure 254. Nous verrons plus loin comment les pôles multiples peuvent s'établir dans les aiguilles, et comment on peut les faire disparaître et les éviter; ce qui est d'une grande importance dans la construction des boussoles.

CHAPITRE II.

DE L'ACTION MAGNÉTIQUE DE LA TERRE.

299. *Direction des aimans — Déclinaison. — Inclinaison*. — Une aiguille aimantée, suspendue horizontalement par un fil de soie, ou posée sur un pivot, n'est pas en équilibre dans toutes les positions, comme serait une aiguille sans magnétisme; mais elle prend une direction déterminée vers un point de l'horizon, et si on l'en écarte, elle y revient par une série d'oscillations plus ou moins rapides. La force qui la rappelle est une force magnétique, car une aiguille non aimantée n'éprouve rien de pareil. Au premier instant, on pourrait supposer que cette direction n'est qu'un phénomène local qui dépend peut-être de quelques mas-

ses de fer ou de quelques aimans situés dans le voisinage; car il ne faut en effet qu'une aiguille à coudre ou un bout de fil de fer pour attirer l'aiguille aimantée hors de cette position et pour la maintenir dans une autre, et rien ne s'oppose à ce que des masses plus fortes, agissant de plus loin, ne la sollicitent et ne la dirigent dans un sens déterminé. Mais ce phénomène se répète partout. Les voyageurs ont porté l'aiguille aimantée dans toutes les contrées de la terre, et il n'est pas un lieu où elle ne prenne une direction fixe, à laquelle elle revient sans cesse lorsqu'on l'en écarte. Dans les régions polaires comme dans celles de l'équateur, au

sommet des plus hautes montagnes comme dans les mines les plus profondes, partout l'aiguille aimantée jouit de cette propriété remarquable. Il y a donc une force magnétique qui fait sentir ses effets dans tous les points du globe terrestre; car une action directrice est nécessairement relative, comme sont toutes les actions à distance; et un corps ne peut pas plus se diriger par lui-même que se mouvoir par lui-même. Dans un cas comme dans l'autre, il y a hors de lui une force qui le sollicite.

Nous pouvons reconnaître, par une expérience facile, que cette force a le caractère essentiel de la force qui émane d'un aimant et non pas de celle qui émane d'une masse de fer; car si l'on renverse les pôles de l'aiguille en la retournant *bout d bout*, elle n'est plus en équilibre dans cette nouvelle position; elle fait une pirouette et décrit d'un côté ou de l'autre toute la demi-circonférence qui l'écarte de sa direction primitive. Donc la force directrice distingue les pôles, et, semblable aux aimans, elle agit par attraction sur l'un et par répulsion sur l'autre, tandis que le fer attire l'un ou l'autre, sans distinction, et avec la même énergie.

Où se trouve le centre de cette action magnétique, si universellement répandue sur tous les points de la terre? C'est une question qui paraît difficile à résoudre, et qui fut autrefois un grand sujet de discussion parmi les physiciens. Les uns mettaient, avec Cardan, le siège de cette force dans une petite étoile qui forme la queue de la grande ourse; les autres la plaçaient au pôle du zodiaque; et même il y en eut qui, trouvant sans doute le ciel trop étroit, imaginaient par delà les cieux et les étoiles un centre attractif d'où arrivait à la terre la force qui dirige les aimans. Mais Gilbert, le premier fondateur de la science du magnétisme et de l'électricité, mit un terme à toutes ces vaines hypothèses en démontrant, autant qu'on pouvait le faire à son époque, que le globe de la terre est magnétique, et que c'est son action qui dirige l'aiguille aimantée (1).

En discutant les observations qui ont été faites dans les différens climats, nous serons en effet conduits, par leur ensemble, à regarder la terre comme un vaste aimant, ayant sa ligne moyenne située vers l'équateur, et ses pôles situés près des pôles de rotation. Tellement que le globe entier, roulé dans la limaille, nous offrirait à peu près

l'apparence des aimans dont nous avons parlé dans le n° 291 et dans les fig. 240 et 241. Ainsi, par rapport au magnétisme, la terre a aussi deux régions, l'une australe et l'autre boréale; mais elles ne coïncident pas avec les régions astronomiques de même dénomination, parce que la ligne moyenne qui les sépare ne coïncide pas exactement avec l'équateur astronomique. Cependant on en tire un moyen de caractériser et définir chacun des fluides magnétiques; on appelle *fluide boréal* celui qui domine dans la région boréale de la terre, et *fluide austral* celui qui domine dans la région australe; et puisque ce sont les fluides de nom contraire qui s'attirent, il en résulte que c'est le pôle *austral* d'une aiguille qui se dirige vers le *nord* et son pôle *boréal* vers le *sud*.

Dans le même lieu les aiguilles aimantées qui sont assez distantes pour ne pas réagir l'une sur l'autre prennent des directions sensiblement parallèles; mais sur des points de la terre qui sont éloignés de quelques degrés en longitude ou en latitude, ce parallélisme n'existe plus; il importe par conséquent de pouvoir définir la direction de l'aiguille aimantée, c'est-à-dire de pouvoir la rapporter à des lignes connues et invariables, afin de reconnaître dans le même lieu, 1° quels sont les changements que cette direction éprouve avec le temps, et, 2° quels sont les rapports qui existent entre les directions que l'on observe dans les lieux différens. Voici à cet égard quelques définitions géométriques qu'il importe de bien saisir.

Le *méridien magnétique* est le plan qui passe par le centre de la terre et par la direction de l'aiguille horizontale, ou simplement la *trace* que ferait ce plan sur la surface de la terre. On sait que le *méridien terrestre* ou le *méridien astronomique* d'un lieu est le plan qui passe par ce lieu et par l'axe de la terre, et que la *ligne méridienne*, ou simplement la *méridienne*, est la *trace* de ce plan sur la surface terrestre. Le méridien magnétique et le méridien astronomique sont deux plans verticaux, puisqu'ils passent l'un et l'autre par le centre de la terre, ou plutôt par la verticale du lieu pour lequel on les considère; mais ces deux plans verticaux peuvent faire entre eux un angle plus ou moins grand.

La *déclinaison* de l'aiguille aimantée est dans chaque lieu l'angle que fait le méridien magnétique avec le méridien astronomique, ou, ce qui revient au même, l'angle que la direction de l'aiguille horizontale fait avec la méridienne. La déclinaison est *orientale* quand le pôle austral de l'aiguille passe à l'est de la méridienne, et *occidentale* quand il passe à l'ouest. Par exemple, si (Fig. 250) est la méridienne de l'observatoire de Paris, et AB la direction de l'aiguille horizontale au même lieu; la déclinaison est occidentale, et se trouve à présent d'environ 22°, car nous verrons qu'elle change avec le temps. Il y a des lieux sur la terre où l'aiguille se dirige exactement suivant la méri-

(1) Gilbert décrit vers la fin du seizième siècle, et son *Traité de Magnétique corporalis, et magnæ terre telluris*, un vrai modèle d'observation et de sagacité: voici ce qu'il dit au troisième livre de cet ouvrage, ch. I, pag. 116 de l'édition de 1613, en parlant des aiguilles qui se dirigent: *Nunc vero quoniam rerum causas et secretissima officina, autem conspiciunt, sed non demonstrant, nobis aperire deest. De hinc conseruandis qui ante nos scripserunt omnes, tam breuiter, tam sepe et acutius iudicis, opusculum nos tradiderunt, ut nomen illis nunquam periret, sedam ipsi satisficere posse viderent, et a prædilectis, omnes verum rationale, inquam iustitia, iuxta, et absurda, omnia demonstrantibus aut argumentis suffragis, relictis, unde et vegetis magis incomprehensum exalaret magnetis scientia.*

dienne : pour ces lieux la déclinaison est nulle, et l'ensemble des points successifs dans lesquels ce phénomène se présente forme ce qu'on appelle des lignes *sans déclinaison*. Nous verrons que d'un pôle à l'autre il existe au moins deux lignes sans déclinaison, qui traversent les mers et les continents dans des directions tout-à-fait sinueuses et irrégulières.

Tout appareil propre à observer la déclinaison s'appelle *boussole de déclinaison*. Dans nos climats et presque par toute la terre, l'aiguille de déclinaison se rapprochant plus des points cardinaux du nord et du sud que de l'est et de l'ouest, on dit communément qu'elle se dirige vers le nord.

L'*inclinaison* est l'angle que fait avec l'horizon une aiguille qui peut se mouvoir librement autour de son centre de gravité dans le plan vertical du méridien magnétique. Concevons une aiguille ACB (Fig. 252) mobile autour d'un axe central C , et pouvant parcourir toute une circonférence dans le plan vertical ZCB ; si ce plan de rotation coïncide avec le méridien magnétique, l'angle ACB sera l'inclinaison du lieu. A Paris, l'inclinaison est d'environ 70° , et c'est le pôle austral qui plonge au-dessous de l'horizon. L'aiguille, il est vrai, fait avec l'horizon quatre angles, qui sont égaux, deux à deux; mais on convient toujours de prendre pour l'inclinaison le plus petit des deux angles qu'elle forme, et même pour fixer les idées, le plus petit des angles que forme sa moitié inférieure; ainsi l'inclinaison est toujours plus petite que 90° .

Les appareils propres à observer l'inclinaison s'appellent *boussoles d'inclinaison*.

Si, par exemple, on part de Paris avec un appareil de cette nature pour s'avancer vers le pôle boréal de la terre, on observe que l'inclinaison augmente en même temps que la latitude, et les voyageurs qui, au milieu des glaces, ont pénétré jusqu'aux régions polaires, ont trouvé des inclinaisons très voisines de 90° ; c'est-à-dire que là l'aiguille d'inclinaison se redresse et s'approche de la verticale. Il y a donc dans ces parages certains points où l'aiguille d'inclinaison doit coïncider exactement avec le fil à plomb; jusqu'à présent aucun voyageur n'a pu dresser ses appareils et faire ses expériences dans ces points précis, que l'on appelle par analogie les *pôles magnétiques* de la terre; mais on sait cependant, d'une manière certaine, que les pôles magnétiques sont à plusieurs centaines de lieues du pôle de rotation, et tout annonce qu'il y en a deux dans l'hémisphère boréal.

Au contraire, si l'on part de Paris pour s'avancer vers le pôle austral de la terre, l'inclinaison diminue avec la latitude. Enfin, lorsqu'on arrive dans la zone équatoriale, on trouve un certain point où l'inclinaison est tout-à-fait nulle, c'est-à-dire où l'aiguille d'inclinaison est exactement horizontale. En passant outre, on retrouve une autre inclinaison; mais alors, c'est le pôle boréal de l'ai-

guille qui plonge au-dessous de l'horizon, et qui plonge de plus en plus à mesure que la latitude australe augmente. Il y a donc vers le pôle austral de la terre d'autres points où l'aiguille d'inclinaison se relèverait exactement dans la direction du fil à plomb, son pôle boréal en bas et son pôle austral vers le zénith, et ces points, dont la position précise est encore inconnue, sont les autres *pôles magnétiques* de la terre; tout annonce qu'il y en a deux au midi comme au nord.

Quel que soit le méridien sur lequel on traverse la zone équatoriale, on trouve toujours un point où l'aiguille est horizontale, et la série de ces points sans inclinaison forme autour de la terre une courbe que l'on appelle *l'équateur magnétique*. Cette courbe est régulière dans une partie de son cours, et alors elle suit très sensiblement la direction d'un grand cercle qui serait incliné à l'équateur terrestre, de 12° à 13° , et qui le couperait d'une part, à l'ouest de la côte occidentale d'Amérique vers l'île Galego, et d'une autre part vers la côte occidentale d'Afrique, en s'inclinant du côté du sud, dans la partie de l'Océan atlantique qui sépare ces deux points; mais des observations répétées indiquent en même temps que l'équateur magnétique éprouve dans la mer du Sud, entre les îles Sandwich et les îles des Amis, des sinuosités nombreuses dont il est difficile de rendre compte.

300. *Points d'application de la force magnétique de la terre.* — Puisque la force magnétique de la terre agit à la manière des aimans, pour diriger l'aiguille aimantée, il est certain qu'elle attire l'un des pôles et qu'elle repousse l'autre; car c'est une loi générale du magnétisme, que si une force n'agit pas indifféremment sur les deux pôles comme le fait le fer doux, elle agit toujours sur l'un d'eux par attraction, et sur l'autre par répulsion. Or, sans rien savoir sur cette force magnétique terrestre, il suffit de remarquer qu'elle est une force universelle agissant dans tous les points du globe, pour conclure que son siège ou plutôt son centre d'action est à une distance infinie, par rapport aux dimensions des aiguilles ou des aimans qui servent à nos expériences, et que par conséquent elle peut, sans erreur, être considérée comme parallèle à elle-même, dans toute l'étendue de ces corps. Par l'action qu'elle exerce sur toutes les molécules de fluide austral qui sont répandues d'un côté de la ligne moyenne d'un aimant, elle compose donc un système de forces parallèles entre elles; et par l'action qu'elle exerce sur toutes les molécules du fluide boréal qui sont répandues de l'autre côté de la ligne moyenne, elle compose un autre système de forces parallèles entre elles et parallèles aux premières.

Ces deux systèmes, l'un attractif et l'autre répulsif, donnent naissance chacun à une résultante unique, dont on peut déterminer la direction, l'intensité et le point d'application, d'après les principes que nous avons posés (21 et 22).

1°. *Pour la direction.* Chaque résultante étant parallèle aux composantes qui la produisent, on voit que nos deux résultantes sont parallèles entre elles, et qu'ainsi toute l'action magnétique de la terre se réduit à un système de deux forces parallèles et opposées.

2°. *Pour l'intensité.* Chaque résultante étant égale à la somme des composantes qui la produisent, on voit que nos deux résultantes seront toujours égales en intensité, si dans un aimant quelconque la quantité de fluide austral est toujours égale à la quantité de fluide boréal. Or, le développement du magnétisme n'étant que la séparation de ces fluides contraires, et chacun d'eux restant enfermé dans la substance de l'aimant sans en pouvoir sortir, il est évident que cette condition est toujours remplie, et que la résultante australe est toujours de même intensité que la résultante boréale. Les deux résultantes étant *parallèles, opposées et égales*, elles forment donc un couple, dont l'intensité est dépendante à la fois, de la vigueur de l'aimant, et de l'énergie de la force magnétique de la terre.

Cette vérité fondamentale : qu'un aimant éprouve de la part de la terre une répulsion et une attraction qui sont toujours égales, et qu'il est par conséquent toujours dirigé sans être jamais ni attiré ni repoussé, peut être confirmée par deux expériences curieuses. La première consiste à peser une aiguille avant de l'aimanter, et à la peser ensuite après lui avoir donné toute la puissance magnétique qu'elle peut recevoir ; l'égalité absolue de ces deux pesées successives est une preuve que la force terrestre ne donne lieu à aucune résultante verticale, car une telle résultante produirait une augmentation de poids si elle agissait de haut en bas, et une diminution si elle agissait de bas en haut.

La seconde expérience fait voir qu'il n'y a pas non plus de résultante horizontale : elle consiste à faire flotter une aiguille aimantée sur la surface de l'eau, en la posant sur un léger morceau de liège qui n'offre que peu de résistance au mouvement. S'il y avait une résultante horizontale, elle entraînerait l'appareil toujours dans le même sens jusqu'à la rencontre d'un obstacle qui fût capable de l'arrêter ; mais on n'observe aucun mouvement de cette espèce, l'aiguille se dirige, et une fois qu'elle est dirigée, elle reste en repos au milieu de la surface liquide sans éprouver le moindre penchant d'un côté ou de l'autre.

L'absence de tout mouvement de translation, et par conséquent de toute résultante dans le sens horizontal, peut encore se démontrer par un appareil plus délicat. On suspend à un fil sans torsion une bande de carton ou une petite planchette très légère (Fig. 246.) ; quand l'équilibre est établi, la planchette étant bien horizontale, on pose d'un côté une aiguille aimantée *as*, et de l'autre un petit contre-poids *r* pour conserver le niveau, et l'on observe que l'aiguille se place toujours dans le méridien magnétique. Or, s'il y avait une force horizontale, quelque petite qu'elle fût, elle ferait tourner le levier autour du fil de suspension, et l'aiguille, suspendue de cette manière, ne pourrait plus prendre la direction qu'elle prend lorsqu'elle est directement posée sur un pivot ou suspendue par son centre de gravité.

3°. *Pour le point d'application.* Les points d'application des deux résultantes magnétiques de la terre ou du couple terrestre, ne peuvent être déterminés dans un aimant que lorsqu'on connaît la distribution du magnétisme de part et d'autre de sa ligne moyenne. Les aiguilles dont on se sert dans les expériences sont en général symétriques par rapport à un axe longitudinal et par rapport à un plan transversal, car elles ont presque toujours la forme d'un cylindre, ou d'un prisme, ou d'un losange très allongé, ou quelque autre forme analogue ; et quand l'aimantation est régulière, la ligne moyenne la divise en deux parties égales, et dans chaque moitié les fluides contraires se trouvent distribués exactement de la même manière. Dans cette hypothèse, il est évident que les points d'application des deux résultantes terrestres se trouvent sur l'axe de figure et à la même distance des extrémités de l'aiguille ; c'est-à-dire qu'ils sont eux-mêmes symétriquement placés par rapport à la ligne moyenne ; voilà ce qui regarde leur position relative.

Quant à leur position absolue nous ne la déterminerons que dans l'un des chapitres suivants ; nous nous contenterons de remarquer ici que, dans tous les cas, l'intensité magnétique augmentant à mesure que l'on s'éloigne de la ligne moyenne, le point d'application de chaque résultante est plus près des extrémités de l'aiguille que de son milieu.

Ces deux points d'application des résultantes terrestres s'appellent les *deux pôles* de l'aimant ; dans ce sens les pôles sont à l'égard du magnétisme ce qu'est le centre de gravité à l'égard de la pesanteur. La ligne qui joint les pôles s'appelle l'axe de l'aimant. Dans la supposition que nous avons faite d'une aimantation parfaitement régulière, l'axe magnétique coïnciderait avec l'axe de figure ; mais dans la pratique il se présente toujours quelque cause accidentelle qui dérange ces conditions mathématiques ; et comme la direction d'un aimant ou d'une aiguille est la direction de son axe magnétique, il ne faudrait pas prendre pour elle la direction de l'axe de figure. Il importe d'écarter cette cause d'erreur, et l'on y parvient par la méthode suivante, que l'on appelle la *méthode du retournement*.

Soit une aiguille horizontale *sm, s'm'* (Fig. 263), dont les pôles sont irrégulièrement placés, l'un en *s*, l'autre en *s'* ; dans sa position d'équilibre, son axe de figure *na* sera, par exemple, avec la ligne méridienne du lieu un angle *acx*, tandis que son axe magnétique fait un angle *axs* ; si l'on retourne les faces sans en retourner les pôles, et qu'on l'a-

bandonne de nouveau à elle-même, elle s'arrêtera dans la position x, x' , de manière que l'axe ax, x' , soit parallèle à ax, x' ; car telle est la condition d'équilibre; alors l'axe de figure a, a' , fait avec la méridienne un angle a, c, n beaucoup plus grand que tout à l'heure, tandis que l'axe magnétique fait le même angle; et il est facile de voir que la moyenne des angles a, c, n et a, c, n est précisément l'angle m, c, n , c'est-à-dire la déclinaison cherchée. C'est ainsi qu'il faut toujours observer la déclinaison, par la méthode du retournement, sous peine de commettre des erreurs qui s'élèvent ordinairement à plusieurs degrés.

La direction de la force magnétique de la terre est maintenant facile à définir et à trouver, car elle est donnée par l'aiguille d'inclinaison. En effet, quand cette force agit seule sur une aiguille, elle ne peut la laisser en repos qu'après en avoir amené l'axe ou la ligne des pôles dans sa propre direction; et pour qu'elle agisse seule sans être combattue ni par la pesanteur ni par aucune résistance, il faut que l'aiguille soit suspendue par son centre de gravité, et qu'elle puisse se mouvoir dans le plan du couple, double condition qui se trouve remplie dans la boussole d'inclinaison, lorsqu'elle est bien faite et lorsqu'elle est exactement tournée dans le plan du méridien magnétique. Nous allons nous occuper des instruments qui servent à observer la direction horizontale et la direction vraie de la force terrestre, et de toutes les précautions qui sont nécessaires pour écarter les causes d'erreur qui se présentent dans ces observations délicates.

301. *Boussole de déclinaison.* — Cet instrument est représenté dans les figures 253, 256, 259 et 260.

gg' (Fig. 260) est l'aiguille de la boussole; ses pôles sont en a et b ; vers son centre elle est percée d'une ouverture t de 7 à 8 millimètres de diamètre, afin qu'elle puisse facilement être soumise à la méthode de retournement: elle est équilibrée d'elle-même sans contre-poids, et par conséquent elle ne pourrait plus se tenir horizontale si elle était désaimantée.

cc' (Fig. 259) est une coupe de la chape en agate. Cette pièce doit être travaillée avec un grand soin, surtout à son sommet intérieur, où est la petite surface courbe qui doit reposer sur la pointe du pivot p , et à son contour extérieur, où vient s'ajuster l'ouverture centrale de l'aiguille.

Le pivot p a sa pointe travaillée sous un angle de 15 à 20°. (Voyez Coulomb, sur le Frottement des Pivots, Mém. de l'Inst., t. III.) L'anneau aa' est destiné à soulever la chape de l'aiguille, soit pour décharger le pivot quand l'appareil n'est pas en expérience, soit pour arrêter des oscillations d'une trop grande amplitude. La tige de cet anneau se prolonge jusqu'à l'extérieur de la boîte, où elle s'ajuste à un bouton qui l'élève ou qui l'abaisse à volonté.

La figure 258 représente la coupe de la boussole,

gg' est l'aiguille;

dd' un cercle divisé sur lequel on lit la division correspondante aux extrémités de l'aiguille;

bb' le bord de la boîte, qui est en cuivre rouge, comme tout le reste de l'appareil;

vv' le verre qui ferme la boîte, pour éviter l'agitation de l'air;

xy un axe solide qui fait corps avec le fond de la boîte, et qui peut tourner sur son extrémité conique inférieure dans une petite cavité de la vis so .

Cette rotation emporte l'axe, la boîte et toutes les pièces adhérentes. Mais en même temps le pied de l'instrument reste fixe, ainsi que le cylindre ll' qui enveloppe l'axe xy , et qui est destiné, au moyen de six rayons tels que ar et or' , à porter le cercle divisé ss' , que l'on appelle *cercle azimuthal*.

Deux nonius, diamétralement opposés, dont l'un est représenté en nn' (Fig. 255) sont fixés sur le bord de la boîte pour tourner avec elle, et pour marquer de quel angle elle tourne soit en partant du zéro, soit en partant d'une division donnée du cercle azimuthal.

Les vis calantes vv' servent à rendre l'appareil horizontal au moyen du niveau xx' .

ll' (Fig. 255) est une lunette; elle est portée sur une axe de rotation aa' , parallèle au cercle des azimuths, et dont le milieu est dans la verticale du pivot. On remplit cette condition au moyen des petites vis qui terminent le montant x' . Dans son mouvement de rotation, la lunette emporte un nonius ins (Fig. 255) qui parcourt l'arc divisé aa' , et qui donne immédiatement l'angle du rayon visuel avec l'horizon.

Pour observer la déclinaison au moyen de cet instrument, on le dispose horizontalement, on fait tourner la boîte pour amener dans le champ de la lunette un astre connu dont on observe la hauteur; en même temps on lit la division correspondante du cercle de l'aiguille et celle du cercle des azimuths, ce qui donne l'angle du méridien magnétique avec le vertical de l'astre au moment de l'observation. Il reste ensuite à trouver, par les méthodes astronomiques, l'angle du vertical de l'astre avec le méridien du lieu pour en déduire la déclinaison. Si l'aiguille de la boussole n'est pas éprouvée d'avance, et si l'on ne connaît pas sur elle l'influence du retournement, il est nécessaire de faire une seconde observation après l'avoir retournée, comme nous l'avons dit précédemment (300).

Pour donner une idée des changements qu'éprouve la déclinaison, nous rassemblerons, dans le tableau suivant, les observations qui ont été faites à Paris à différentes époques.

Tableau des déclinaisons observées à Paris.

Année 1580.	11° 30' est.
1618.	8 id.
1663.	0
1678.	1 30 ouest.
1700.	8 10 id
1767.	19 16 id.
1780.	19 55 id.
1785.	22 00 id.
1805.	22 5 id.
1813.	22 28 id.
1814.	22 34 id.
1816, 12 oct., 3 heures après midi,	22 25 id.
1817, 10 fév., 1 heure après midi,	22 19 id.
1818, 15 oct., 2 heures après midi,	22 22 id.
1819, 22 av., 2 heures après midi,	22 29 id.
1820.	" " "
1821.	" " "
1822, 9 oct., midi.	22 11 id.
1823, 21 nov.	22 23 id.
1824, 13 juin, 1 heure après midi,	22 23 id.
1825, 18 août, midi.	22 22 id.
1826.	" " "
1827.	22 20
1828.	22 6
1829.	22 12

On voit, 1° que, depuis 1580, la déclinaison a varié de plus de 30°;

2°. Que c'est en 1663 qu'elle a été nulle;

3°. Que sa marche a été sensiblement progressive vers l'ouest depuis les premières observations jusqu'en 1820;

4°. Que, depuis cette époque, elle semble épronver un mouvement rétrograde vers l'orient.

Il importe de consigner exactement les époques des observations, car l'heure du jour a même une influence sur les résultats.

La boussole marine ou compas de variation n'est autre chose qu'une boussole de déclinaison; seulement elle est suspendue de manière à se maintenir, en milieu de l'agitation de la mer, dans une situation sensiblement horizontale. Les figures 257 et 261 représentent une vue et une coupe de cet instrument.

bb', bords de la boîte dont le fond est en ff.

v, verre qui la ferme.

p, pivot qui peut être élevé ou abaissé au moyen de la vis w.

gg', aiguille dont la chape est en e.

rr', feuille mince de papier doublée d'une feuille de talc ou de quelque autre substance légère et rigide. Ces feuilles forment ce qu'on appelle la rose des vents; elles sont attachées ou collées à l'aiguille pour se mouvoir avec elle. La rose est un cercle dont le centre est dans la verticale du pivot, et dont la circonférence porte à la fois des divisions en degrés, et les signes des vents.

pp', deux pinnules, la première ayant une fente étroite, et la seconde, une large fente au milieu

de laquelle on suspend un petit fil à plomb. m, miroir à faces bien parallèles, incliné de 55°, ayant à peu près la largeur de la pinnule oculaire p. La petite bande du miroir qui correspond à la fente de cette pinnule est désignée dans sa partie supérieure seulement, pour que l'observateur puisse, au travers de la glace, viser au fil de la pinnule p'.

o, position de l'œil au moment de l'observation. Au moyen des deux pinnules, on vise à un astre, ou à un objet situé dans l'horizon, ou élevé de 15 ou 20°. En même temps on voit, par réflexion sur le miroir, en s une portion de la ligne de foi qui est peinte en noir sur le bord intérieur de la boîte, et en r la division de la rose qui se trouve vis-à-vis la ligne de foi, c'est-à-dire dans le plan vertical du pivot et des fentes des pinnules.

De cette manière on connaît d'un seul coup d'œil l'angle de l'aiguille ou du méridien magnétique, avec le plan vertical de l'astre ou de l'objet. Il reste à déterminer par les moyens connus l'angle de ce dernier plan, avec le méridien astronomique du lieu, pour en déduire la déclinaison. Tout l'instrument est porté sur une traverse rr' (Fig. 257) qui se visse, au moyen de la plaque r, sur un pied, où elle peut tourner librement. Un cercle fixe cc' est porté sur cette traverse; un cercle intérieur cc' repose sur le premier, et tourne sur l'axe xx'; enfin la boîte elle-même est portée par ce cercle mobile, et tourne sur lui, au moyen de l'axe xx' qui est perpendiculaire à xx'. C'est par ces deux mouvements rectangulaires que la boîte conserve son horizontalité; ils constituent ce qu'on appelle la suspension de Cardan.

La boussole a été en usage chez les Chinois longtemps avant d'être connue en Europe. On peut conclure de plusieurs documents authentiques, rapportés dans la Description de l'empire de la Chine de Duhalde, que plus de mille ans avant Jésus-Christ les Chinois se servaient de la boussole pour se diriger sur les continents. On a supposé que Marco Paolo nous avait apporté cette invention; mais ce voyageur célèbre, qui connut si bien la Chine, ne fut de retour en Europe qu'en 1295; et il est parlé de la boussole dès 1180, dans les vers de Goyot de Provins, et dès 1265 dans l'histoire de Norwège. On s'accorde en général à regarder les Mégalithiens comme les premiers inventeurs de la boussole européenne; et il paraît constant que son usage ne fut un peu répandu que vers l'an 1300.

On croyait, dans les premiers temps, que l'aiguille aimantée se tournait directement au nord dans tous les lieux de la terre; et l'on rapporte que Colomb fut très étonné d'observer une déclinaison en 1492, lorsqu'il parcourait l'Océan pour aller découvrir le Nouveau-Monde. Il paraît que Cabot, de Venise, qui devint grand-pilote d'Angleterre, fit des observations analogues vers l'an 1600.

Le fait de la déclinaison une fois connu, il fallait découvrir les variations qu'elle éprouve lorsqu'on passe d'un lieu à l'autre. Les premières tables un peu précises qui constatent ce phénomène im-

portant furent dressées en 1699 par les navigateurs hollandais, d'après les ordres du prince de Nassau.

Enfin, le ehangement de la déclinaison dans le même lieu fut découvert, en 1622, par Gunter, professeur au collège de Gresham : il trouva à Londres une déclinaison orientale de $6^{\circ} 13'$; tandis qu'elle avait été trouvée de $11^{\circ} 15'$ aussi à l'orient, en 1580, par Robert Norman, le même qui découvrit l'inclinaison en 1576.

302. *Boussole d'inclinaison.* — Elle est représentée dans les figures 263, 264, 265 et 266.

La figure 264 représente l'aiguille d'inclinaison gg' vue sur sa largeur, et la figure 265 la représente vue sur son épaisseur. Les sections s , s' , s'' , donnent une idée de sa forme.

xx' est une sorte de virole ou d'anneau en cuivre qui s'ajuste, à frottement très dur, vers le milieu de la longueur de l'aiguille; il porte un axe en cuivre cc' , terminé par de petits cylindres d'acier poli a et a' , qui forment l'axe de rotation. L'axe mathématique aa' de ces deux cylindres doit passer par le centre de gravité de l'aiguille : on essaie d'atteindre cette condition, ou du moins d'en approcher le plus possible, en plaçant l'anneau convenablement et en faisant monvoir les vis latérales vv' (Fig. 264).

L'aiguille est en place dans la figure 263; le rectangle sur lequel elle repose est une pièce importante de la boussole. On le voit plus en grand et avec plus de détails dans la figure 266, qui ne contient que l'un de ses côtés. Il se compose d'une traverse fixe tt' qui porte le couteau d'agate pp' , et d'une autre traverse xx' , mobile autour de l'axe a . Celle-ci porte une fourchette f qui soulève l'axe de l'aiguille quand on ne veut plus qu'elle repose sur le couteau d'agate, et d'une pièce d'arrêt a qui empêche l'axe de glisser sur la fourchette. Cet ajustement est combiné pour que l'axe de l'aiguille se trouve exactement au centre du limbe d'inclinaison ll' (Fig. 263), et perpendiculaire à son plan dès qu'on laisse la fourchette pour commencer l'observation.

Le limbe ll' repose perpendiculairement sur une plaque solide rr' , qui porte aussi les montans du rectangle, une cage en verre cc' et un niveau nn' . Tout ce système est mobile autour d'un axe vertical xx' , qui passe par le centre du cercle ll' , et par conséquent par le centre de gravité de l'aiguille. Un nonius nn' , attaché à la plaque rr' , parcourt le cercle aimuthal ss' pour marquer à chaque instant sur ce plan les angles décrits par le limbe vertical.

Pour observer l'inclinaison avec cet instrument, quand on connaît déjà la déclinaison ou la direction du méridien magnétique, on met le limbe vertical dans cette direction, et l'aiguille vient d'elle-même se placer suivant la ligne d'inclinaison; si l'on ne veut pas attendre qu'elle soit en repos, on prend le milieu des petites oscillations qu'elle fait avant de s'arrêter. Après ce premier résultat, on

retourne les faces de l'aiguille sans en retourner les pôles, afin de corriger par ce retournement les erreurs qui pourraient provenir soit de l'irrégularité de l'aimantation, soit de l'excentricité du centre de gravité; mais ces deux causes d'erreur n'étant par là qu'imparfaitement compensées, il est nécessaire de faire deux autres observations pareilles, après avoir renversé les pôles de l'aiguille en l'aimantant en sens contraire. C'est la moyenne de ces quatre résultats qui donne l'inclinaison.

On peut facilement se dispenser de déterminer d'avance la déclinaison. En effet, le compte terrestre étant contenu dans le plan du méridien magnétique, l'aiguille n'est jamais sollicitée à sortir de ce plan, et par conséquent elle doit se diriger verticalement quand on l'oblige à se mouvoir dans un plan vertical perpendiculaire à ce méridien. Réciproquement, si l'on tourne le limbe de la boussole jusqu'à ce que l'aiguille soit verticale, on peut être assuré qu'il est alors perpendiculaire à l'aiguille de déclinaison, et il suffit de lui faire décrire, à partir de là, 90° sur le cercle aimuthal pour l'amener dans le méridien magnétique. On pourrait encore, pour plus de simplicité, chercher par quelques tâtonnements l'aimuth du limbe qui donne le minimum d'inclinaison; ce minimum est l'inclinaison du lieu, puisque de part et d'autre l'aiguille se rapproche de la verticale (1).

Coulomb avait proposé de déterminer l'inclinaison (*Mém. de l'Inst.*, t. IV, pag. 665) par un autre moyen que l'on a recommandé depuis comme très

(1) Il suffit d'une construction géométrique très simple pour expliquer ce qui arrive à l'aiguille d'inclinaison pendant que le limbe de la boussole décrit une circonférence rotative sur le cercle des aimuths.

Soit va (Fig. 284) la direction du méridien magnétique, c le centre de l'aiguille, a son pôle incliné, et ca la direction qu'elle prend, en sorte que son prolongement ac marque la direction de la force magnétique de la terre; aa' est l'angle d'inclinaison, et ca' est l'angle de l'aiguille avec la verticale cv .

Si sur aa' , comme diamètre, nous décrivons une circonférence, elle sera le lieu de toutes les positions que doit prendre le pôle a pendant que le limbe fait une révolution rotative autour de c . En effet, quand le limbe est en vv' , par exemple, il faut que le pôle soit en a' et l'aiguille dirigée suivant ca' ; car ca' étant perpendiculaire sur vv' , le plan caa' est perpendiculaire sur le plan $vv'c$; la force de la terre qui agit en a' étant parallèle à av , se trouve comprise dans le premier de ces plans, et par conséquent elle peut être décomposée en deux autres, l'une suivant aa' , qui sera détruite comme perpendiculaire au plan caa' que peut décrire l'aiguille; l'autre suivant le prolongement de ca' , qui sera pareillement détruite, comme dirigée vers le point fixe. La position ca' est donc la position d'équilibre de l'aiguille. Ainsi, pendant la rotation du limbe, elle décrit un cône oblique dont le centre est en c , et dont le haut est aa' .

Il résulte de là un autre moyen de trouver l'inclinaison sans connaître la déclinaison; car les lignes va , va' et va'' et les autres lignes parallèles peuvent être considérées comme les tangentes des arcs que fait l'aiguille avec la verticale dans les divers aimuths va , va' , va'' , etc. Or, pour deux aimuths tels que va' et va'' , faisant entre eux un angle droit, on a

$$va'a' + va'a'' = a'a'a'' = va'a''.$$

Les angles $va'a'$ et $va'a''$ étant connus par l'observation, il suffit donc de prendre le somme des carrés de leurs tangentes pour avoir le carré de la tangente va , qui est la tangente du complément $a'cv$ de l'inclinaison. En faisant ainsi plusieurs exemples d'ob-

exact, mais qui me semble cependant soumis à trois causes d'erreur. Il part de ce principe, que la somme des moments des forces qui tendent à ramener une aiguille horizontale dans le plan du méridien magnétique est donnée par la formule

$$\frac{r l \lambda}{3 \lambda}$$

r est le poids de l'aiguille;

l est la moitié de sa longueur;

λ est la longueur du pendule simple qui ferait ses oscillations dans le même temps que l'aiguille.

Ce principe est rigoureux, mais, premièrement, il suppose à l'aiguille une régularité de forme et une petitesse dans ses dimensions transversales que l'on ne peut jamais lui donner; et, secondement, il suppose qu'elle oscille autour de l'axe vertical passant par son centre de gravité, ce qui est loin d'être vrai dès que l'inclinaison est un peu grande. Cependant, si on l'admet, il est facile de trouver la valeur numérique de cette somme de moments. Pour l'aiguille de Coulomb l'on avait $r = 88^r, 80^s$, $l = 213^{mm}, 3$; et comme elle faisait 50 oscillations en $496''$, il est facile de voir (53) que $\lambda = 994$ (495/50) s; d'où il résulte

$$\frac{r l \lambda}{3 \lambda} = 13^r, 824.$$

Ce moment correspond à l'unité de distance, c'est-à-dire à 1 millimètre.

Pour trouver ensuite le moment vertical, on suspend l'aiguille, comme le filé d'une balance, sur son axe passant à peu près par le centre de gravité; on cherche le contre-poids qu'il faut mettre sur le pôle boreal, pour la ramener à l'horizontalité. Ce contre-poids était dans l'expérience de Coulomb, de $0^r, 3$ placés à $170^{mm}, 5$ de l'axe de suspension. Ce résultat suffirait si cet axe pouvait en effet passer exactement par le centre de gravité; mais pour se mettre à l'abri de cette circonstance on aimante l'aiguille en sens contraire, et c'est ici où se trouve la troisième cause d'erreur: car il faut l'aimanter pour qu'elle fasse encore, comme la première fois, cinquante oscillations en $496''$; ce qui est excessivement difficile. Cependant, ce point une fois atteint, en la remet en équilibre sur son axe, qui doit n'être pas déplacé, et on cherche de nouveau le contre-poids qui la rend horizontal; il était de $0^r, 2093$ placés à $104^{mm}, 5$.

La moyenne de ces deux contre-poids donne $37^r, 348$ pour l'unité de distance, ou 1 millimètre; ainsi, la composante horizontale de l'action de la terre étant représentée par $13,824$, sa composante verticale est représentée par $37,348$. La résultante de ces deux forces, ou l'action de la terre elle-même, fait donc avec l'horizon un angle dont

la tangente est $37,348/13,824$. C'est l'inclinaison; elle se trouve de $69^{\circ} 41'$.

On peut la supposer exacte, parce qu'elle a été déterminée par Coulomb, qui a sans doute atténué, autant qu'il était possible, toutes les causes d'erreur, et compensé par son adresse ce qui restait de défectueux dans le procédé.

Le tableau suivant contient diverses inclinaisons observées à Paris. Celles qui précèdent 1798 peuvent offrir des erreurs assez considérables, parce qu'alors on ne prenait pas la moyenne de quatre observations, comme nous l'avons indiqué.

Tableau de l'inclinaison pour Paris.

Année	1671	75°
	1754	72 1' 8"
	1776	73 26
	1780	71 48
	1791	70 52
	1798	69 51
	1806	69 13
	1810	68 50
	1814	68 36
	1816	68 40
	1817	68 38
	1818	68 35
	1819	68 25
	1820	68 20
	1821	68 14
	1822	68 11
	1823	68 8
	1824	68 7
	1825	68 0
	1826	68 0
	1827	"
	1828	"
	1829	67° 41'.

Sauf quelques irrégularités qui sont peut-être des erreurs d'observation, il résulte de ce tableau que l'inclinaison, à Paris, a été toujours en diminuant depuis 1671, et que la quantité de sa diminution a été sensiblement variable d'une année à l'autre.

La découverte de l'inclinaison remonte à l'année 1676; elle est due à Robert Norman, ingénieur en instruments dans l'un des faubourgs de Londres: jusque là on avait supposé que l'aiguille devait être horizontale, et lorsqu'en Europe on voyait son pôle austral s'abaisser, on se contentait d'admettre que le centre de gravité était mal déterminé. Robert Norman, observateur plus ingénieux et plus précis qu'on ne l'était alors, mena le contre-poids qu'il fallait ajouter, et fut conduit ainsi à l'une des plus importantes découvertes du magnétisme.

303. *Aiguille statique.* — On appelle ainsi une aiguille aimantée qui est soustraite à l'action de la terre et qui n'a plus de position statique où elle se trouve en équilibre sous l'influence de cette force.

erreurs rectangulaires, et en prenant la moyenne des résultats, on arrive à une valeur de l'inclinaison qui se trouve corrigée autant que possible de toutes les erreurs de l'équilibre et de toutes les irrégularités de l'aimantation.

La construction de l'aiguille astatique repose sur ce principe, qu'un corps mobile, autour d'un axe, ne peut recevoir aucun mouvement d'une force qui agit parallèlement à cet axe.

L'aiguille aimantée *gg* (Fig. 253) étant donc mobile autour de l'axe *aa'*, il suffit d'amener cet axe dans la direction de la force magnétique de la terre pour qu'elle soit indifférente dans toutes ses positions. Deux mouvements rectangulaires conduisent à ce but : l'un est produit au moyen de la vis sans fin *v*, et du rouet *c*, dans lequel elle engrène ; l'autre au moyen de la vis *v'* et du rouet *c'*. Le cercle divisé *c* sert à marquer les positions de l'aiguille.

On peut encore rendre une aiguille astatique en neutralisant l'action magnétique de la terre par une autre action magnétique, égale et contraire. Il suffit pour cela de posséder un barreau d'une assez grande force, pour qu'à une distance très grande par rapport aux dimensions de l'aiguille il agisse sur elle aussi énergiquement que le fait la terre : alors on le place dans le plan du méridien magnétique, en le disposant parallèlement à la direction que prendrait l'aiguille dans son équilibre et en tournant vers elle son pôle répulsif, c'est-à-dire son pôle austral, s'il est du côté du nord, et son pôle boréal s'il est du côté du midi. A une distance trop petite, le barreau est plus puissant que la terre, il fait pirouetter l'aiguille et la maintient dans cette position renversée ; à une distance trop grande la terre est plus puissante que lui, et l'aiguille conserve sa direction naturelle ; enfin à une certaine distance intermédiaire, la compensation a lieu, et l'aiguille reste indifférente dans toutes ses positions. Mais l'on conçoit que la force terrestre qui forme un couple ne peut être exactement compensée que par un couple égal et opposé, et le barreau ne peut donner naissance à un couple qu'en agissant avec la même énergie sur les deux pôles de l'aiguille ; voilà pourquoi il doit être placé à une distance très grande par rapport à la distance de ses pôles.

Il y a enfin un autre moyen plus simple et plus direct de se donner un système astatique : il consiste à réunir sur un même axe deux aiguilles tournées en sens contraire l'une de l'autre. La Fig. 253 représente un système astatique dont l'axe commun est l'axe de rotation ; alors les deux aiguilles doivent être parfaitement identiques pour la forme et pour la distribution du magnétisme. Quand elles sont disposées bout à bout, et que l'axe de rotation est perpendiculaire à leur longueur, il est facile de voir qu'on peut obtenir une compensation très approchée avec des aiguilles sensiblement différentes.

Pour arriver par ce procédé à une compensation plus parfaite, et pour varier à volonté la force directrice que l'on doit, dans une foule d'expériences, conserver au système, j'ai coutume de disposer l'appareil comme on le voit dans la Fig. 254. L'une des aiguilles est horizontale et l'autre in-

clinée ; la force directrice de celle-ci diminuant à mesure que l'en augmente son inclinaison, il est facile de la rendre parfaitement égale et opposée à celle de la première, ou un peu moindre ou un peu plus grande.

304. *Variations diurnes.* — L'aiguille de déclinaison éprouve tous les jours quelques mouvements à l'est ou à l'ouest du méridien magnétique ; tantôt ces mouvements sont brusques et accidentels, tantôt ils sont réguliers et périodiques ; dans le premier cas on les nomme *perturbations* ; dans le second cas ils composent ce qu'on appelle les *variations diurnes*. Dans les jours qui ne sont pas marqués par quelques perturbations, l'on observe à Paris les phénomènes suivans : pendant la nuit l'aiguille est à peu près stationnaire ; au lever du soleil elle se met en mouvement, et son pôle austral (ou son extrémité nord) marche à l'ouest comme s'il fuyait l'influence de cet astre ; vers midi, ou plus généralement de midi à trois heures, il atteint son maximum de déviation occidentale ; ensuite, par un mouvement contraire, il revient à l'orient jusqu'à 9, 10 ou 11 heures du soir : alors, soit qu'il ait repris exactement sa position primitive, soit qu'il s'en trouve seulement très rapproché, il s'arrête et reste immobile pendant toute la durée de la nuit, pour recommencer le lendemain une oscillation pareille. L'amplitude de la variation diurne est l'angle que parcourt l'aiguille depuis la station du matin jusqu'au maximum de déviation occidentale. Cet angle est tous les jours variable ; cependant il résulte des nombreuses observations de M. de Cassini, qu'en général il est plus grand pendant l'été, depuis l'équinoxe du printemps à l'équinoxe d'automne, et plus petit pendant l'hiver, depuis l'équinoxe d'automne à l'équinoxe du printemps. Sa valeur moyenne pour les mois d'avril, mai, juin, juillet, août et septembre, paraît d'être de 13' à 15', et seulement de 8' à 10' pour les mois d'octobre, novembre, décembre, janvier, février et mars. Il y a des jours où il s'élève jusqu'à 20', et d'autres où il ne dépasse pas 5 ou 6'.

On doit encore à M. de Cassini cette remarque importante, que dans les caves de l'Observatoire l'aiguille de déclinaison éprouve aussi des changemens journaliers ; là, à plus de 80 pieds sous terre, à l'abri de toutes les influences de la lumière et de la chaleur du jour, l'amplitude de ses variations est la même qu'à la surface du sol, et c'est aux mêmes heures qu'elle est immobile, qu'elle marche à l'occident et qu'elle revient à l'orient.

Dans les régions plus septentrionales, comme en Danemark, en Islande et au nord de l'Amérique, les variations diurnes sont en général plus considérables et moins régulières ; il paraît aussi que l'aiguille ne conserve pas pendant la nuit l'immobilité qu'on observe à Paris, et que c'est vers le soir seulement qu'elle atteint son maximum de déviation occidentale.

Au contraire, en partant du nord pour aller vers l'équateur magnétique, les variations diurnes vont sans cesse en diminuant d'amplitude, et sur l'équateur magnétique lui-même elles sont sensiblement nulles. Il paraît cependant, d'après quelques observations du capitaine Duperrey, que la position du soleil, au nord ou au midi de l'équateur terrestre, pourrait avoir quelque influence pour faire osciller, de part et d'autre de l'équateur magnétique, les points qui sont sans variations.

Au midi de l'équateur magnétique, les variations diurnes se produisent dans un ordre inverse : l'extrémité nord de l'aiguille marche vers l'est, aux mêmes heures où dans l'hémisphère boréal elle marche à l'ouest ; ce résultat curieux est constaté par les observations qui ont été faites, en 1794, 1795 et 1796, au fort Marlborough de Sumatra et à Sainte-Hélène, par M. J. Macdonald ; en 1818, 1819 et 1820, à l'île de France, à Timor, à Rawak, à Guham, à Mowé et au port Jackson, par le capitaine Freycinet ; et en 1822, 1823 et 1824, dans plusieurs points qui avoisinent l'équateur magnétique, par le capitaine Duperrey.

On ne sait pas encore d'une manière précise si, dans chaque hémisphère, les variations diurnes se font dans le même sens aux lieux où la déclinaison est occidentale, et aux lieux où elle est orientale. Il y a sur ce point quelque discordance entre les observations trop peu nombreuses que nous possédons, et c'est un phénomène sur lequel il importe d'appeler l'attention des physiciens.

Il est probable que l'aiguille d'inclinaison est soumise à des variations diurnes, comme celle de déclinaison ; mais elle a moins d'amplitude dans ses mouvements, et il n'a pas été possible, jusqu'à ce jour, de les observer avec précision.

En généralisant ces résultats, on peut présumer qu'une aiguille aimantée, mobile dans un plan quelconque, éprouverait des oscillations journalières, et qu'une aiguille qui serait mobile dans tous les sens autour de son centre de gravité, décrirait chaque jour un cône dont la base serait une ellipse ou une autre courbe, plus ou moins allongée dans les différents lieux de la terre.

Les variations diurnes furent observées pour la première fois par Graham, à la fin de 1722 ; ensuite elles furent étudiées avec soin, en Suède, par Norrter et Celsius vers 1740, et par Wargentin en 1750 ; à Londres, par Canton, en 1756 ; en Danemark, par Lous, de 1765 à 1772 ; à Rome, par le père Ascleppi, en 1772 ; en France, par M. de Cassini, de 1780 à 1790. Depuis cette époque, les instruments sont devenus plus parfaits, les observations se continuent sur plusieurs points du globe, et les voyageurs, dans leurs courses autour du monde, doivent les compter comme un des objets les plus importants de leurs recherches.

La figure 262 représente la boussole de variation. Tous les observateurs ne peuvent pas sans doute

se procurer un instrument aussi complet ; mais tous peuvent disposer des aiguilles d'après les principes de sa construction, et arriver ainsi à une assez grande exactitude dans les observations. Il est presque inutile de faire remarquer que toutes les pièces de métal sont en cuivre rouge très pur.

xx'. Table de marbre blanc, sur laquelle reposent les colonnes et la boîte de l'instrument.

xx'. Colonnes pour la suspension.

LxLx'. Colonnes pour le premier microscope.

LxLx'. Colonnes pour le second microscope.

s s'. Boîte de la boussole.

a a'. Aiguille aimantée, passée de champ dans un petit anneau de cuivre a a' ; à cet anneau est attaché un fil, ou plutôt un assemblage de fils de soie sans torsion, qui porte l'aiguille et qui vient s'enrouler sur le petit treuil t. Ce fil est maintenu au centre du cercle divisé cc', en traversant, là, une petite ouverture triangulaire. Il est enfermé dans une petite cage de verre, qui s'élève entre les deux colonnes LxLx' pour que l'air ne puisse ni l'agiter ni pénétrer dans la boîte ; en tournant le treuil t dans un sens ou dans l'autre on peut élever ou abaisser l'aiguille. Deux lames de verre, mobiles à volonté, ferment les ouvertures de la boîte, qui correspondent aux deux extrémités de l'aiguille ; sur chacune de ces extrémités est solidement fixée une petite plaque d'ivoire, portant des divisions très fines, dont la valeur angulaire dépend de la distance au centre de suspension ; c'est en général 15 ou 20'.

Après avoir disposé l'appareil à peu près dans le plan du méridien magnétique, et l'avoir nivelé soigneusement, on s'assure que le fil de soie est sans torsion, et par quelques tâtonnements on arrive à diriger les microscopes r et r' sur la ligne de foi de l'aiguille, dont on voit la trace sur les deux plaques d'ivoire. Alors il est facile d'observer les déplacements qu'elle éprouve, soit en comptant les divisions qui ont passé sous le fil, soit en suivant ses mouvements, au moyen des vis de rappel qui font marcher les microscopes. De petites loupes, p et p', mobiles sur les tiges t et t', servent à lire la position ou la course de chaque microscope sur la traverse qui le porte, et qui règle son mouvement latéral.

La lunette r'' est destinée à compter plus commodément, et par conséquent plus sûrement les oscillations de l'aiguille, lorsqu'on veut l'employer à la détermination des intensités magnétiques. Elle porte au devant de l'objectif un miroir qui ramène les rayons verticaux dans la direction de son axe.

305. *Perturbations de l'aiguille aimantée.* — Plusieurs causes naturelles agissent sur l'aiguille aimantée, pour la déranger brusquement de sa position, ou pour troubler au moins la régularité de ses variations diurnes. Entre toutes ces causes, l'ancre boréale paraît la plus efficace et la plus infatigable : quand ce météore se lève pour les régions du nord, le ciel est resplendissant de lumière ; et pendant toute sa durée, qui est quelquefois de

dix à douze heures, l'aiguille aimantée éprouve une agitation continuelle et une déviation considérable. Le *sommet* de l'arc étincelant de l'aurore boréale est en général dans le méridien magnétique, et sa *couronne*, c'est-à-dire le foyer vers lequel s'élancent les gerbes de feu qui semblent partir de l'horizon ou de l'arc lui-même, se trouve toujours à peu près dans le prolongement de l'aiguille d'inclinaison. Ce n'est pas seulement dans les lieux où l'aurore boréale est visible que la boussole est agitée; elle l'est aussi à de grandes distances, à Paris, par exemple, lors même qu'on n'aperçoit dans le ciel aucune trace de lumière. Mais, en général, l'agitation est d'autant plus grande que le phénomène est plus voisin et se montre avec plus d'intensité; ainsi, la boussole de l'Observatoire éprouve souvent, dans le jour ou dans la nuit, une déviation subite qui s'élève parfois à plus de 1°, sans qu'en en puisse découvrir la cause apparente; et l'on apprend aussitôt qu'aux mêmes instans les boussoles de Londres et de Pétersbourg ont éprouvé des mouvemens analogues, et que dans les contrées du nord on a observé quelque brillante aurore boréale. Un observateur, dans son cabinet, est donc averti par la boussole de ce qui se passe dans les régions polaires, comme il est averti par le baromètre de ce qui se passe dans les plus hautes régions de l'atmosphère.

Les tremblemens de terre et les éruptions des volcans paraissent agir aussi sur l'aiguille aimantée, et quelquefois ces phénomènes la dérangent d'une manière permanente. D. Bernoulli a vu, en 1767, l'inclinaison diminuer d'un demi-degré par un tremblement de terre, et le père de La Torre a remarqué des changemens de plusieurs degrés dans la déclinaison pendant une éruption du Vésuve.

Enfin l'on a supposé que les ouragans, la neige et les orages ont aussi quelque influence sur l'aiguille aimantée; mais il faut probablement rapporter aux aurores boréales les changemens sur lesquels on a fondé cette opinion. Cependant, quand le tonnerre frappe des corps aimantés, on quand il tombe seulement à quelque distance du lieu où ils sont, il change, détruit, ou renverse leur magnétisme; on en a vu de trop malheureux exemples à bord des vaisseaux: plusieurs fois les boussoles de service ont vu leurs pôles renversés par la foudre, et les navigateurs prenant alors le nord pour le sud, couraient avec confiance se jeter dans les écueils. La découverte de l'électro-magnétisme nous expliquera ces phénomènes.

306. *Intensité magnétique de la terre.* — Un des points les plus importans de la théorie du magnétisme terrestre est la détermination de son intensité pour les différens points de la surface du globe, ou pour le même point, à des époques différentes. C'est dans ces derniers temps seulement qu'on a eu l'heureuse idée d'appliquer à cette recherche des moyens susceptibles de quelque précision. Graham paraît être le premier qui se soit occupé de cette

question, vers la fin de 1722; Muschenbroek fit quelques efforts pour la résoudre en 1729; Lemonnier, en 1776, se contenta d'en montrer l'importance; de Saussure voulut comparer la force magnétique de la terre, à Genève et au sommet du Mont-Blanc; enfin Borda, reprenant la question dans toute sa généralité, indiqua les moyens de la résoudre avec une grande approximation; et bientôt après, sa méthode fut employée par M. de Humboldt, dans son voyage d'Amérique, et dans un autre voyage en France, en Prusse et en Italie.

Cette méthode est fondée sur les oscillations nombreuses que fait une aiguille librement suspendue, lorsqu'on l'écarte un peu de sa position, et qu'ensuite on l'abandonne à elle-même. Si elle est régulièrement aimantée, et que l'axe de suspension passe par son centre de gravité, elle oscille par l'effort du couple magnétique de la terre, comme oscillerait séparément chacune de ses moitiés, sollicitée par l'une des forces du couple. Ainsi, elle forme un véritable pendule composé, qui reste parfaitement identique, quand la distribution du magnétisme reste exactement la même dans tous les points de sa substance; car si le fluide libre éprouvait quelque changement, soit dans sa quantité, soit dans son arrangement, la résultante aurait une autre intensité en un autre point d'application, et la même aiguille formerait en réalité un pendule différent. Supposant donc que l'aiguille reste matériellement et magnétiquement la même, une différence dans la durée de ses oscillations ou pourra dépendre que d'une différence dans l'intensité des forces qui la sollicitent, et la pesanteur restant la même, elle ne pourra dépendre que d'une différence dans l'intensité de la force magnétique. Or, sous ces conditions, les intensités de la force et les durées des oscillations sont liées par le principe suivant: que les forces sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations exécutées dans le même temps. Ainsi, x étant la force magnétique qui agit sur l'aiguille quand elle fait x oscillations dans un certain temps, dans 100'' par exemple, et x' étant la force qui la sollicite quand elle fait x' oscillations dans le même temps de 100'', l'on a

$$\frac{x}{x'} = \frac{n}{n'^2}.$$

Si, par exemple, on avait trouvé $x = 25$ et $x' = 24$, on aurait

$$\frac{x}{x'} = \frac{625}{576} = 1,085,$$

c'est-à-dire que la première force serait à la seconde comme 1,085 est à 1, ou comme 1085 est à 1000.

Pour appliquer cette méthode on peut faire osciller une aiguille, soit dans le plan du méridien magnétique, autour de la ligne d'inclinaison, soit perpendiculairement au méridien magnétique autour de la ligne de déclinaison; on pourrait même la faire osciller dans d'autres positions, mais l'on n'y trouverait nul avantage.

Oscillations de l'aiguille d'inclinaison. — Puisque le plan du méridien magnétique varie à chaque instant, il faut apporter un grand soin à placer la boussole dans sa vraie direction du moment; et puisqu'on doit compter un grand nombre d'oscillations de l'aiguille, il faut aussi apporter un grand soin à donner à l'axe toute la mobilité qu'il peut prendre sur ses deux couteaux d'agate. Ces conditions remplies, on écarte l'aiguille de 3 ou 4° de sa position d'équilibre, on l'abandonne à elle-même, et avec un chronomètre, ou une bonne montre à secondes, on compte très soigneusement le nombre des oscillations qu'elle exécute dans un temps donné. Après quelques séries d'observations successives, dont on prend la moyenne, on enlève l'aiguille, on la conserve dans un étui avec beaucoup de précautions, pour qu'elle ne reçoive aucun choc ou aucune influence magnétique étrangère, et ensuite on peut l'emporter dans des voyages, pour répéter des expériences pareilles en différents points du globe. Mais pour que les résultats puissent inspirer de la confiance, il est nécessaire d'avoir plusieurs aiguilles de cette espèce qui se vérifient l'une l'autre, et même il est convenable de revenir au même lieu, les faire osciller encore une fois, pour s'assurer qu'elles ont bien conservé leur magnétisme. Dans la recherche de l'inclinaison, la méthode du retournement (300) peut corriger les erreurs qui proviendraient d'une aimantation irrégulière, ou d'un déplacement du centre de gravité; mais pour les recherches d'intensité, l'aiguille devant rester absolument identique, il faut se garder de l'aimanter en sens contraire, et par conséquent il faut, par tous les moyens de vérification, s'assurer que son magnétisme est régulier, et son centre de gravité bien placé.

Oscillation de l'aiguille de déclinaison. — La force qui fait osciller l'aiguille de déclinaison n'est qu'une partie de la force magnétique de la terre, et une partie d'autant plus petite que l'inclinaison est plus grande; tellement, qu'aux pôles magnétiques où l'inclinaison est de 90°, l'aiguille de déclinaison n'a plus de force, ni pour se diriger ni pour osciller. En général, si étant l'angle d'inclinaison, d'un lieu (Fig. 267), la force terrestre, dont l'intensité est a , se décompose en deux autres par la règle du parallélogramme des forces (257) : l'une, verticale, ayant pour valeur $a \sin i$, et qui est détruite par la suspension; et l'autre, horizontale, ayant pour valeur $a \cos i$, qui est seule efficace pour diriger et pour faire osciller l'aiguille de déclinaison. Pour un autre lieu, où l'intensité serait a' et l'inclinaison i' , la force horizontale serait $a' \cos i'$ et les deux forces seraient entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations x et x' , qu'elles font exécuter à la même aiguille dans le même temps. On aurait donc

$$\frac{x \cos i}{x' \cos i'} = \frac{a^2}{a'^2} \text{ ou } \frac{x}{x'} = \frac{a^2 \cos i'}{a'^2 \cos i},$$

c'est-à-dire qu'ayant observé dans des lieux différents les nombres d'oscillations x et x' que fait la même aiguille, dans le même temps, il faut, pour avoir le rapport des forces magnétiques, multiplier le rapport carré des nombres d'oscillations par le rapport inversé des cosinus d'inclinaison.

Cette méthode d'observation semble avoir quelque avantage sur la précédente, 1° parce qu'il faut un artiste très habile pour faire une aiguille d'inclinaison tolérablement bonne et bien équilibrée, tandis qu'une aiguille de déclinaison s'équilibre d'elle-même dans la chape de papier où elle est suspendue; 2° parce que les couteaux d'agate et l'axe de l'aiguille d'inclinaison offrent beaucoup plus de frottement que le fil de soie sans torsion qui suspend l'aiguille de déclinaison. Cependant il y a dans les oscillations horizontales une source d'erreur inévitable : l'un des pôles de l'aiguille ayant une tendance à plonger au-dessous de l'horizon, il en résulte que le prolongement du fil de suspension ne passe jamais par le centre de gravité; de là une différence dans les deux bras de levier de l'aiguille horizontale, et une différence qui change avec l'inclinaison. Il est d'autant plus nécessaire de signaler cette cause d'erreur qu'elle a échappé aux plus habiles observateurs, bien qu'elle soit assez influente pour rendre tout-à-fait incomparables les observations faites en des lieux où l'inclinaison est très différente.

Comme l'acier le mieux préparé ne conserve pas son magnétisme indéfiniment sans altération, il est impossible d'avoir des comparaisons d'intensité fort exactes pour des époques un peu éloignées.

En discutant les observations d'intensité qui ont été faites en différents points de la terre, soit en Europe, soit en Amérique; soit dans les îles de l'Océan, de la mer des Indes ou de la mer Pacifique, on arrive à ce résultat général que l'intensité est la plus petite vers l'équateur magnétique, et qu'elle va en augmentant à mesure qu'on s'en éloigne vers le nord ou vers le sud. Il paraît que vers les pôles elle serait environ une fois et demie aussi grande qu'à l'équateur. Dans le même lieu elle paraît changer aussi avec les variations diurnes, mais les différences très petites qu'elle éprouve demandent à être constatées par de nouvelles observations.

307. *De l'action de la terre sur le fer doux.* — La terre exerce une action continue sur toutes les substances qui contiennent du magnétisme; elle agit comme un vaste aimant qui fait sans cesse effort pour attirer ou repousser les fluides décomposés, et pour décomposer les fluides naturels. Les différents corps magnétiques répandus sur la surface du globe résistent plus ou moins à cette puissance universelle, suivant l'intensité de leur force coercitive, mais tous en éprouvent quelque modification. Le fer doux est sous ce point de vue le corps le plus curieux à étudier, puisqu'il n'offre aucune résistance à la séparation de ses fluides, et

qu'il ne conserve rien des actions magnétiques qu'il a subies. Les expériences suivantes nous donneront une idée des phénomènes qu'il présente.

Une barre de fer doux de deux ou trois pieds de longueur est mise en présence d'une petite aiguille d'épreuve (Fig. 268).

Quand la barre est tenue verticalement, ou à peu près dans la direction de l'inclinaison, elle prend un pôle austral à son extrémité inférieure x ; et un pôle boréal à son extrémité supérieure x' . C'est ce qu'il est facile de voir par les actions attractives et répulsives qu'elle exerce sur l'un ou sur l'autre pôle de l'aiguille, lorsqu'on la fait glisser de haut en bas ou de bas en haut, pour amener successivement en présence toutes les parties de sa longueur.

Pour s'assurer que le fer est sans force coercitive, et que c'est bien l'action terrestre qui décompose son magnétisme, il suffit de retourner rapidement la barre, l'extrémité x en haut, et l'extrémité x' en bas; alors le pôle austral reste en bas, et le pôle boréal en haut: le second est cette fois en x et le premier en x' . Ainsi les fluides ont été instantanément recomposés par leur action mutuelle et instantanément décomposés en sens inverse par l'action terrestre.

Ce qui se manifeste d'une manière si frappante sur une barre d'une certaine longueur, se manifeste avec moins d'intensité sur une pièce plus courte dans le sens de l'inclinaison. C'est pourquoi l'effet semble à peu près nul lorsqu'on tient la barre horizontalement, et surtout dans une position perpendiculaire au méridien magnétique.

Sous l'influence de l'aimant terrestre, tous les corps magnétiques deviennent donc de véritables aimans, mais des aimans à pôles mobiles et changeans; de telle sorte qu'il suffit de les retourner de haut en bas pour que leurs pôles se renversent, et de varier un peu leur position pour que leurs pôles éprouvent quelques déplacements dans l'intérieur de leur substance. Ce résultat nous indique combien il y a de précautions à prendre lorsqu'on veut faire avec les boussoles des observations exactes; car le fer qui entre dans la construction des édifices agit de deux manières sur les aiguilles aimantées; il agit par la décomposition magnétique qu'il éprouve de la part de l'aiguille elle-même, et il agit surtout par les fluides libres, que la terre y maintient dans un état permanent de séparation. Avec quelques soins l'on peut aisément reconnaître les perturbations locales qui résultent de cette cause, car dans un espace un peu considérable, dans une lieue carrée, par exemple, l'action terrestre ne produit en général que quelques minutes de différence, soit dans l'inclinaison soit dans la déclinaison.

368. *Des causes mécaniques et chimiques qui ont une influence sur la force coercitive.* — Lorsqu'une barre de fer doux est soumise à l'action magnétique de la terre, il suffit de la frapper de quelques coups

de marteau à l'une ou l'autre de ses extrémités, pour fixer au moins en partie les fluides décomposés, par lesquels elle agit sur l'aiguille. Après la percussion elle est un aimant à pôles fixes, et de quelque côté qu'on la retourne le même fluide se montre toujours à la même extrémité. Ainsi la percussion donne au fer doux de la force coercitive; cette force est sans doute locale, et n'existe que dans les molécules qui ont reçu le choc, car en retournant la barre, et en la frappant dans cette position inverse de la précédente, on parvient à l'aimanter en sens contraire. On peut ainsi renverser ses pôles autant de fois que l'on veut; et ce qui est encore digne de remarque, c'est qu'après quelques jours, ou quelquefois même après quelques heures, la force coercitive a disparu, et il faut de nouveaux chocs pour la reproduire.

Cette expérience curieuse donne la clef d'un grand nombre de phénomènes, sur lesquels j'insisterai d'autant plus volontiers, que personne à ma connaissance n'en a donné la véritable explication. Tout le monde sait que les substances magnétiques sont presque toujours dans un état d'aimantation plus ou moins marqué. C'est un certain Jules César, chirurgien de Rimini, qui observa le premier la transformation du fer en aimant; il fit cette remarque vers 1500, sur une barre de fer qui avait soutenu quelque construction en brique sur le sommet d'une tour de l'église de Saint-Augustin. Plus tard, vers 1630, Gassendi fit la même observation sur la croix du clocher de Saint-Jean d'Aix, qui était tombée frappée de la foudre; il en trouva le pied consumé par la rouille et jouissant de toutes les propriétés de l'aimant. Depuis cette époque les observations se sont multipliées, et l'on a reconnu qu'un morceau de fer un peu rouillé est presque toujours un aimant plus ou moins fort; qu'il en est de même de la fonte, de l'acier et des autres substances magnétiques; enfin l'on a reconnu que la rouille, ou l'oxidation, n'est pas du tout nécessaire pour qu'un corps s'aimante, et qu'il suffit pour cela de lui faire subir quelque action mécanique, de le tordre, de le battre, de le limer ou de le tourmenter de quelque manière: par exemple, dans la boutique d'un serrurier tous les outils sont des aimans, et il n'est pas rare que les aiguilles, les instrumens tranchans et les autres objets d'acier, présentent des traces de magnétisme polaire. Dans tous ces phénomènes, ce n'est ni l'action chimique, ni l'action mécanique qui magnétisent les corps; mais c'est l'action de la terre, sans cesse agissante, qui décompose les fluides; et la décomposition une fois faite, elle est maintenue par la force coercitive, qui résulte des déplacements chimiques ou mécaniques qu'éprouvent les molécules. Pour m'en assurer par l'expérience, il m'a suffi de comparer les quantités de magnétisme que prennent les corps, suivant la position qu'on leur donne, par rapport à la direction de la force terrestre. Dans une position verticale ils s'aimantent fortement, par l'osi-

dation on par les actions mécaniques, et le pôle austral est toujours en bas. Dans des positions plus obliques, l'effet est moindre, mais toujours dans le sens voulu par le pôle boréal de la terre, qui est le pôle dominant dans nos climats. On peut même, d'après cette donnée, fabriquer de toutes pièces des aimans très puissans, soit avec du fil de fer, soit avec des barres du fer ou d'acier. Pour aimanter des fils de fer sans aimant, il suffit d'en couper trente ou quarante bouts, de la longueur d'un pied par exemple, et en les tenant verticalement de les tordre sur eux-mêmes, un à un, jusqu'à les rendre raides et cassans; chacun d'eux devient fortement magnétique, et on les réunit ensuite pour en former deux faisceaux, avec lesquels on aimante les plus gros barreaux, par les procédés que nous ferons connaître. Pour aimanter sans aimant des barres de fer ou d'acier, il suffit de battre les premières en les tenant verticalement; et pour les secondes il suffit de les frotter dans le même sens, avec une barre de fer verticale.

Les aimans naturels n'étant que des oxydes de fer, il est probable qu'ils doivent leurs propriétés magnétiques à l'action de la terre qui s'est exercée sur eux au moment de leur formation. Car les mines de fer qui existent de nos jours ne sont pas aussi anciennes que le monde. Et sans admettre qu'à l'origine le fer fût dans son état pur et métallique, il est certain que les combinaisons dans lesquelles il est engagé à la surface du globe et dans toute l'étendue de la croûte que nous exploitons, ne furent pas toujours ce qu'elles sont aujourd'hui. Le travail chimique qui s'accomplit sans cesse et qui sans cesse se renouvelle depuis tant de siècles dans les entrailles de la terre, fait passer les molécules les plus inertes par une foule de combinaisons différentes, et change de mille manières leurs agrégations primitives. Les mines magnétiques sont soumise à des mutations perpétuelles comme les autres élémens pondérables, et l'on peut dire avec certitude qu'à chaque instant il y en a qui se décomposent, et qu'à chaque instant il y en a d'autres qui se forment et dont les pôles sont arrangés suivant les lois voulues par le magnétisme général de la terre. Telle est sans doute la cause première qui a développé du magnétisme dans les aimans naturels, soit dans ceux que possèdent les Chinois depuis plus de trois mille ans, soit dans ceux qui furent observés par Pythagore et par Platon, soit dans ceux que nous exploitons aujourd'hui et qui servent à nos recherches. Il n'y a donc à notre connaissance que le magnétisme développé qui puisse développer du magnétisme; cette conclusion a été rigoureusement jusqu'à la découverte de M. Oersted, qui a ouvert un nouveau champ dans les sciences en démontrant, comme nous le verrons dans un des livres suivans, que l'électricité aussi peut développer du magnétisme.

303. *De l'action de la terre sur le fer des vaisseaux, et des moyens de corriger la déviation que la*

boussole en éprouve. — De grandes masses de fer sont employées dans nos vaisseaux; les uns font partie de la construction et restent fixes; les autres font partie de l'armement et sont plus ou moins mobiles, comme les canons de fer ou de fonte, les ancres, les cables, les harrigues et les outils de toute espèce. Tous ces corps magnétiques, dispersés çà et là dans les différentes parties du bâtiment, doivent exercer sur la boussole et exercer en effet une action considérable. Les déviations produites par cette cause, méritent toute l'attention des physiciens; elles s'élèvent quelquefois à 15 ou 20 degrés, et fussent-elles quinze ou vingt fois moindres, elles seraient encore plus que suffisantes pour exposer les navigateurs à de très grands dangers. Il paraît que c'est Wales, astronome de l'expédition de Cook, qui a, le premier, signalé cette source d'erreurs dans les observations à la mer; plus tard, leur véritable cause fut indiquée par Downie, et c'est le capitaine Flinders, célèbre par ses découvertes et par son intrépidité, qui fit le premier quelques essais heureux pour s'en mettre à l'abri. Tout récemment M. Bain a rappelé l'attention sur ce point important. Plusieurs officiers de la marine anglaise en ont fait l'objet de leurs recherches, et le professeur Barlow de Woolwich a été couronné par la Société Royale de Londres pour les heureux résultats auxquels il a été conduit en s'occupant de cette question. C'est l'ouvrage de M. Barlow qui nous servira de guide dans ce que nous allons dire.

Dans un vaisseau, l'aiguille de la boussole peut être déviée, 1^o par les décompositions de fluide qu'elle excite elle-même dans les substances magnétiques; 2^o par l'état magnétique permanent que ces substances peuvent avoir en vertu de leur force coercitive; 3^o par l'état magnétique passager qu'elles prennent sous l'influence de l'aimant terrestre.

La première cause ne peut produire que de faibles effets; et l'on s'en garantit sûrement en plaçant l'habitacle à une distance assez grande de toutes les pièces de fer, ce qui est toujours possible.

La seconde cause aurait un remède facile; car l'aiguille aimantée se trouvant placée, à l'égard des divers pôles on centres magnétiques du vaisseau, à une distance très grande par rapport à sa longueur, il en résulte que chacun de ces centres agit sur elle par un couple. Par la composition de tous ces couples partiels on aurait donc un couple résultant qui resterait toujours le même dans tous les climats et pour toutes les positions du vaisseau. Ce couple, à son tour, se composerait avec le couple terrestre, et c'est là ce qui produirait la déviation de l'aiguille. Mais, dans le même lieu, quand le vaisseau tournerait sur lui-même autour d'un axe vertical, le couple terrestre conservant la même direction dans l'espace, et le couple du vaisseau tournant avec lui, on voit qu'il en résulterait une déviation variable, susceptible d'un

maximum à droite du méridien magnétique, et d'un autre maximum égal à sa gauche; de telle sorte que la moyenne entre ces deux positions extrêmes de l'aiguille donnerait sa vraie direction. Pour d'autres latitudes, le couple terrestre serait plus intense ou plus oblique, mais la déclinaison se trouverait encore de la même manière, par la rotation complète du vaisseau autour d'un axe vertical.

Eofin, la troisième cause est plus puissante que les deux premières, et ses effets, sans cesse variables, sont aussi plus difficiles à apprécier et à corriger. Nous allons pour un moment supposer qu'elle agisse seule pour dévier l'aiguille aimantée. Alors il est clair que tous les corps magnétiques du vaisseau deviennent des aimans à pôles changeans; quand le vaisseau tourne sur lui-même dans un sens ou dans l'autre, ces corps se présentent autrement à l'action de la terre, et éprouvent de sa part des décompositions différentes. Ces phénomènes, déjà si compliqués dans le même lieu, se compliquent encore, quand le vaisseau, sillonnant les mers, passe successivement dans des contrées où le couple terrestre change de direction ou d'intensité. Tous ces effets divers ne peuvent être ni prédits ni même indiqués par la théorie, et ce n'est que par des essais plus ou moins ingénieux que l'on peut les neutraliser. Voici les moyens que propose M. Barlow pour y parvenir.

Le bâtiment étant dans une rade tranquille où l'on peut le virer de bord, on choisit à quelque distance sur le rivage un lieu d'où l'on puisse l'apercevoir dans toutes les positions qu'il prend en tournant sur lui-même. Là s'établit un observateur avec une boussole et un théodolite, ou quelque autre instrument propre à mesurer les angles. Sur le vaisseau, près de la boussole déjà fixée dans l'habitable, est un autre observateur, ayant aussi un instrument pareil. A un signal donné les observateurs visent l'un à l'autre, et chacun d'eux détermine l'angle de son aiguille avec l'axe de sa lunette. Puisque les observateurs se regardent, les axes des deux lunettes ne font qu'une seule et même ligne, que nous appellerons *la ligne centrale*. Or, la boussole du rivage n'éprouvant point de perturbation, il est évident que si la boussole du vaisseau n'en éprouvait pas, les deux aiguilles seraient parallèles et feroient le même angle avec la ligne centrale; car la distance de quelques centaines de pieds qui se trouve entre elles ne peut pas produire de changement sensible dans la déclinaison. Donc la différence de ces deux angles est la déviation produite par les corps magnétiques du vaisseau, à l'instant de l'observation. Concevons que, par des manœuvres qui sont toujours faciles pendant la calme, on fasse faire au vaisseau une révolution complète, et qu'à chaque rumb de vent qu'il parcourt, ou à chaque angle de 10 ou 12 degrés dont il tourne, on fasse une observation pareille à la précédente, alors on aura pour chacune de ces positions la valeur de la déviation locale

produite par les corps magnétiques dont il est chargé. On pourrait ensuite, s'il était nécessaire, trouver, par des interpolations, les déviations correspondantes à chaque degré. Cette première opération terminée, l'observateur du rivage enlève sa boussole, et à sa place il substitue celle du vaisseau, en la posant au même point, sur une espèce de cage en bois, qui peut faire une révolution complète autour de la verticale du pivot de l'aiguille. Cette cage est représentée dans la figure 273. Sur l'un de ces côtés on voit, de distance en distance, des trous qui sont destinés à recevoir le compensateur magnétique; nous appellerons ainsi l'appareil qui doit corriger ou faire connaître la déviation produite par le fer du vaisseau.

Le compensateur magnétique se compose d'une tige *r* en cuivre rouge, d'un pouce et demi de diamètre, et de deux plaques de fer *r'* de 12 ou 13 pouces de diamètre (mesures anglaises), d'une épaisseur telle que le pied carré pèse 3 liv.; ces deux plaques sont séparées par une feuille de carton, et pressées l'une contre l'autre au centre par l'éroux extérieur de la tige de cuivre, et sur les bords par trois petits écrous en fer; voilà tout l'appareil: on le dispose comme il est représenté dans la figure 273. Alors la cage en bois emportant le compensateur dans son mouvement de rotation, l'aiguille de la boussole en est affectée diversement dans les différents azimuths, et, par des tâtonnemens, on arrive enfin à lui faire éprouver de la sorte toute la série des déviations qu'elle éprouvait sur le vaisseau. Cela fait, l'on marque soigneusement la position du centre de la plaque par rapport à l'aiguille de la boussole, et quand celle-ci a repris sa place sur le vaisseau, on ajuste le compensateur sur le pied qui la porte (Fig. 272), de manière qu'il ait à son égard exactement la même position.

Par ce moyen, la déviation semble doublée et non pas corrigée, puisque le compensateur produit un effet justement égal à celui que produit le fer du vaisseau et dans le même sens. Elle est doublée en effet, et c'est là ce qui donne la moyen de la trouver. D'abord on enlève le compensateur pour faire une première observation de déclinaison, et l'on trouve, par exemple, 36 degrés à l'ouest: ensuite on place le compensateur pour faire une seconde observation; l'on trouve, par exemple, 40 degrés à l'ouest. Ce second résultat étant plus fort que le premier, c'est une preuve que les actions locales augmentent la déclinaison. La différence $40 - 36 = 4$, fait voir que le compensateur, pour sa part, l'augmente de 4 degrés, donc le fer du vaisseau l'augmente d'autant; ainsi la vraie déclinaison est $36^\circ - 4^\circ = 32^\circ$. Au contraire, si l'observation faite avec le compensateur donnait un moindre résultat, ce serait une preuve que les actions locales diminuent la déclinaison, et la différence des deux observations devrait s'ajouter à la première pour avoir la déclinaison du lieu. Il faut

done dans tous les cas suivre cette règle générale : faire deux observations , l'une sans compensateur , l'autre avec le compensateur ; retrancher la seconde de la première , et cette différence , prise avec son signe étant ajoutée à la première observation , le résultat sera la déclinaison cherchée.

S'il se trouve , dans le vaisseau , des corps aimantés d'une manière permanente , il est évident que leur influence se trouve corrigée en même temps que celle qui résulte de l'action de la terre.

Cet ingénieux procédé n'est pas sans difficulté dans la pratique : 1^o les changements de température affectent diversement l'aiguille de la boussole , les plaques du compensateur et les diverses substances magnétiques du bâtiment ; 2^o toutes ces substances ont des forces coercitives plus ou moins persistantes , en vertu desquelles elles conservent dans chaque position une partie du magnétisme qu'elles avaient reçu dans des positions différentes , 3^o il résulte des mêmes causes qu'en changeant de lieu le couple terrestre produit sur elles des effets qui ne peuvent être proportionnels. Il faut donc voir dans le compensateur de M. Barlow un appareil propre à atténuer les grandes déviations que la boussole éprouve à la mer , mais encore insuffisant dans sa forme actuelle pour les faire connaître avec exactitude.

309. *De l'influence du magnétisme sur la marche des chronomètres.* — Plusieurs marins , habiles observateurs , ont remarqué que leurs chronomètres n'avaient pas la même marche à bord et sur le rivage. Les différences s'élevaient quelquefois de 5'' à 10'' par jour. On conçoit de quelle importance est ce phénomène , puisque toute l'exactitude des observations nautiques et géographiques que l'on peut faire à la mer est dépendante de l'exactitude avec laquelle on mesure le temps. Les chronomètres ayant dans leur construction plusieurs pièces d'acier , et surtout des pièces mobiles qui sont emportées par le balancier , il est naturel de supposer qu'ils sont par là soumis aux influences magnétiques. En effet , la proximité d'un aimant suffit pour altérer leur marche ; de nombreuses expériences en ont donné la preuve , et l'on a reconnu aussi que des masses de fer doux , aimantées par la terre , produisent le même phénomène. Sur un vaisseau , c'est donc la même cause qui dévie la boussole et qui trouble la marche des chronomètres ; aussi a-t-on essayé de la neutraliser dans les deux cas par le même moyen ; mais , pour les chronomètres , ce qu'il y a jusqu'à présent de meilleur à faire , c'est de les tenir au même lieu , dans la même position , et le plus loin qu'il est possible de toute substance magnétique.

CHAPITRE III.

DES LOIS ET DE LA THÉORIE DU MAGNÉTISME.

310. *Différents moyens de comparer les forces magnétiques.* — Le premier moyen qui se présente pour estimer les forces relatives des aimans naturels ou artificiels consiste à les mettre en contact avec une même pièce de fer que l'on charge ensuite de poids graduellement croissans , jusqu'à l'instant où elle se détache , entraînée par le poids total , qui est alors la limite de ce que la force magnétique peut porter. Ce moyen ne peut donner qu'une grossière approximation : l'insuffisance en fut bientôt reconnue , et cependant il fut à peu près le seul dont on fit usage jusqu'en 1780. A cette époque , Coulomb , par ses belles découvertes , ouvrit de nouvelles routes dans la science , et il donna enfin des méthodes sûres pour mesurer , avec le dernier degré de précision , tous les effets des puissances magnétiques. Dans ce qui va suivre , nous aurons souvent recours aux Mémoires qu'il publia sur ce sujet (tom. 9 des Savans étrangers , Mémoires de l'Académie , 1784 , 1785 , 1789 ; et Mémoires de l'Institut , tom. 4 et 6).

Coulomb a employé avec avantage deux moyens

différens pour mesurer la force des aimans : 1^o les oscillations d'une aiguille suspendue à des fils de soie plate ; 2^o la torsion des fils de cuivre ou d'argent disposés dans un appareil qu'il nomma balance de torsion , et qu'on appelle aujourd'hui balance de Coulomb.

311. *Oscillations.* — Nous avons déjà dit (306) qu'un aimant qui oscille sous l'influence magnétique de la terre , peut être assimilé à un pendule composé ; d'où il suit que , pour trouver la valeur absolue de la force qui le sollicite , il suffirait de connaître son moment d'inertie par rapport à l'axe de suspension , et la position exacte de ses pôles ou de ses centres magnétiques , et le nombre des oscillations qu'il fait dans un temps donné. Mais la force absolue , en vertu de laquelle un aimant accomplit ses oscillations , est un élément complexe dépendant à la fois de l'intensité du magnétisme qu'il possède , et de l'intensité du magnétisme que possède le corps qui agit sur lui ; car l'une ou l'autre de ces intensités devenant double , par exemple , la force résultante serait double aussi ,

et elle deviendrait quadruple si les deux intensités étaient l'une et l'autre doublées. Faute de pouvoir déterminer une intensité magnétique d'une manière absolue, nous sommes réduits à comparer entre elles les résultantes totales qui impriment le mouvement. Alors le problème devient plus simple; les changements d'intensité n'apportant pas de changements sensibles dans la position des pôles, l'axe de rotation reste invariable ainsi que les moments d'inertie, et il est permis en conséquence de s'appuyer sur ce principe, que les forces magnétiques qui sollicitent un aimant sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations qu'il exécute dans un temps donné. D'après cela nous pouvons comparer les forces magnétiques que possède un corps, soit qu'il puisse osciller lui-même, soit qu'il doive rester fixe dans des positions déterminées.

1°. Pour constater l'état magnétique d'une aiguille, on la suspend horizontalement dans une épreuve de papier ou de métal à un assemblage de fil sans torsion (1); et l'on compte le nombre n des oscillations qu'elle exécute dans un temps donné, dans $10'$, par exemple, sous l'influence de la force de la terre. Ensuite, si par des moyens quelconques, on a changé son intensité, sans toutefois changer la position de ses pôles, et que l'on veuille comparer ce second état au premier, il suffit de la suspendre de la même manière, et de compter de nouveau le nombre n' des oscillations qu'elle fait dans le même temps de $10'$; le rapport de ces deux intensités magnétiques n et n' sera donné par la proportion

$$\frac{n}{n'} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

Si, par exemple, en n pour le premier cas $n=71$, et pour la deuxième $n'=100$, on aura

$$\frac{n}{n'} = \frac{5041}{10000} = 0,5041,$$

c'est-à-dire que la seconde force est presque double de la première. Ce résultat suppose que l'action de la terre a été la même dans les deux cas; ce qui est sensiblement vrai quand on opère dans le même lieu et à des époques qui ne sont pas très éloignées.

2°. Pour comparer les divers degrés de force d'un aimant qui ne peut être suspendu pour osciller lui-même, on le fait agir, dans ses différents états magnétiques, sur une petite aiguille d'épreuve ayant une grande force coercitive, de peur que son magnétisme ne soit décomposé par influence; mais d'abord on constate l'état de cette

(1) Pour donner à ces fils beaucoup de force, on réunit parallèlement des fils de coco, on y attache un poids, et pendant qu'ils sont également tendus, on les humecte à plusieurs reprises avec de l'eau gommée, en les pressant de haut en bas entre les doigts. Le poids reste jusqu'à ce qu'ils soient secs et bien agglutinés.

aiguille, soumise à l'action seule de la terre. Soit a le nombre des oscillations qu'elle fait dans un temps donné, par l'effet de la composante horizontale n , du magnétisme terrestre; soit n' le nombre des oscillations qu'elle fait dans le même temps, sous l'influence de la terre et de l'aimant, n' étant alors la somme des composantes horizontales qui agissent sur elle; soit a'' le nombre des oscillations qu'elle fait, toujours dans le même temps, pour un autre état de l'aimant, n'' étant la somme des composantes horizontales correspondantes. Pour la première et la seconde expérience, on aura

$$\frac{n'}{n} = \frac{n^2}{n'^2};$$

pour la première et la troisième on aura

$$\frac{n''}{n} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

Mais, en supposant que l'aimant dont on cherche la force soit placé, dans les deux cas, de manière que sa composante horizontale soit aussi dans le méridien magnétique, et conspirant avec celle de la terre, il est évident que sa force est dans le premier cas $n' - n$, et dans le second cas $n'' - n$; or, la première et la seconde équation donnent respectivement

$$\frac{n' - n}{n} = \frac{n^2}{n'^2} \text{ et } \frac{n'' - n}{n} = \frac{n^2}{n'^2};$$

d'où l'on tire

$$\frac{n' - n}{n' - n} = \frac{n^2 - n^2}{n'^2 - n^2}.$$

Tel est le rapport des deux composantes horizontales de l'aimant, dans les deux états en dans les deux positions successives où il a été placé par rapport à l'aiguille.

Si, par exemple, l'aiguille d'épreuve fait 30 oscillations en $10'$, quand la terre agit seule, qu'elle en fasse 40 quand un aimant agit sur elle dans son premier état et 50 quand il agit dans son second état, on aura

$$n = 30, n' = 40, n'' = 50;$$

et les deux composantes horizontales de cet aimant seront entre elles comme 700 est à 1600, ou comme 7 est à 16.

312. *Balance de torsion.* — Lorsqu'un fil de métal est tendu verticalement par un certain poids, il prend une position d'équilibre; et si l'on fait tourner le poids sur lui-même, d'une ou de plusieurs révolutions, ou seulement d'un angle de quelques degrés, le fil éprouve une torsion dans toute sa longueur, et fait un effort pour revenir sur lui-même et pour ramener le poids à sa position primitive. Coulomb a étudié le premier cette force de torsion, et nous allons énoncer les lois remarquables aux-

quelles il a été conduit; nous reviendrons sur ce sujet dans le Livre des Actions moléculaires.

1°. La force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion;

2°. Elle est, dans un même fil, en raison inverse de sa longueur et indépendante de sa tension;

3°. Pour des fils de même substance et de différente épaisseur elle est proportionnelle à la quatrième puissance des diamètres.

Ces lois ont été vérifiées sur les cheveux, sur la soie et sur les fils d'argent, de fer et de laiton de différents diamètres.

La balance dans laquelle on mesure la force magnétique, par cette force de torsion, est représentée dans les figures 277, 274 et 275 : la figure 277 représente tout l'appareil mis en expérience, la figure 274 est une coupe horizontale correspondant à l'extrémité inférieure du fil, et la figure 275 représente le micromètre supérieur. Ce micromètre est composé de la manière suivante : ss' est une plaque circulaire qui termine le cylindre lv' ; elle est percée en son centre d'une large ouverture θ ; nn' est un disque mobile s'appliquant exactement sur la plaque ss' , tournant sur elle à frottement très doux, et maintenu dans son mouvement de rotation par une petite douille qui s'élève du milieu de ss' ; vers le centre c de nn' est un trou triangulaire, dont l'un des angles aboutit exactement au centre; c'est dans cet angle que passe le fil fi ; de là il vient s'attacher au treuil t , qui est supporté par deux pièces fixes p et p' sur lesquelles il peut tourner. La plaque ss' est divisée sur tout son contour, et le disque nn' porte un point de repère, qui parcourt ces divisions et qui indique par conséquent les divers degrés de torsion que l'on donne au fil à son extrémité supérieure. Dans la figure 277, on voit la pince qui s'attache à l'extrémité inférieure du fil; elle porte une espèce d'étrier en cuivre mince dans lequel on met les aiguilles aimantées; et pour éviter des oscillations trop prolongées, on adapte à l'étrier un volant qui plonge dans un vase rempli d'eau. Sur le contour de la cage on colle une bande de papier portant des divisions de degrés en degrés, dont la grandeur est déterminée par le prolongement des rayons, tels que cr , cr' , etc. Le fil doit occuper le centre de ces divisions, et cette condition est remplie quand un rayon visuel quelconque passant par le fil tombe sur deux divisions diamétralement opposées, par exemple, sur 0 et 180, sur 90 et 270, etc.

La balance étant ajustée, on détermine la position d'équilibre du fil en plaçant dans l'étrier une aiguille non aimantée; après quoi l'on y place une aiguille aimantée, et l'on tourne le micromètre supérieur dans un sens ou dans l'autre, jusqu'à ce que le plan d'équilibre du fil coïncide avec la direction de cette aiguille; alors on est sûr qu'elle est dans le méridien magnétique, et que le fil est sans torsion. Supposons maintenant que l'on tourne le micromètre pour écarter l'aiguille de sa position,

pour la porter par exemple en $\nu \lambda'$ (Fig. 274), de manière qu'elle forme avec le méridien nn' un angle $\lambda \nu \lambda'$ de 20° ; soit 180° l'angle dont on le tourne; le fil à son extrémité inférieure n'ayant marché que de 20° , la torsion qui lui reste est $180^\circ - 20^\circ$ ou 160° ; c'est cette force qui fait équilibre à la force directrice de la terre, c'est-à-dire à la composante horizontale qui tend à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique. Soit x l'intensité de la force horizontale terrestre $\nu \lambda'$; elle peut se décomposer en deux, l'une $\nu \lambda'$ qui se détruit, ou du moins qui ne fait pas tourner l'aiguille, et l'autre $\nu \lambda''$ qui est tout entière efficace; la valeur de celle-ci est $x \sin. \nu$ en représentant par ν la déviation $\lambda \nu \lambda'$. Au-dessous de 15° à 20° , les angles peuvent sensiblement être pris pour les sinus, et dans ces limites la force directrice est donc exprimée par $x \nu$.

Dans l'exemple qui nous occupe $\nu = 20^\circ$; ainsi $20^\circ x$ est la force qui est balancée par une torsion de 160° ; et puisque la force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion, il en résulte enfin que pour 1° de déviation la force directrice serait seulement de $160/20 = 8$. En général, nous ramènerons ainsi la force directrice à 1° de distance.

La même aiguille ayant reçu une autre quantité de magnétisme, il faudrait, par exemple, tourner le micromètre de 400° pour l'écarter de 15° ; sa force directrice serait alors $400 - 15/15 = 480/15 = 32$. Elle serait donc exactement quadruple de ce qu'elle était dans la première expérience.

Pour déterminer la force d'un aimant qui ne peut être lui-même horizontalement suspendu dans la balance, on le fait agir sur l'aiguille de l'expérience précédente, et pour plus de simplicité on le dispose de manière que son centre d'action tombe sensiblement en λ (Fig. 274). Alors on tourne le micromètre pour obtenir une déviation moindre que 20° , et il est facile de voir comment les expériences s'achèvent, soit que l'aimant qu'on éprouve agisse par attraction ou par répulsion. Dans le premier cas la force directrice est la somme des actions de la terre et de l'aimant; dans le second cas, elle est leur différence.

313. *Les attractions et les répulsions magnétiques sont en raison inverse du carré de la distance.* — Cette loi fondamentale du magnétisme avait été soupçonnée par quelques physiciens, mais c'est Coulomb qui en a le premier donné la démonstration rigoureuse par les deux méthodes dont nous venons de parler.

1°. *Par les oscillations.* Une petite aiguille d'éprouve, suspendue à un fil de cocon, est mise à l'abri des agitations de l'air; elle fait quinze oscillations en $1'$; soit m la force horizontale de la terre qui la sollicite. On fait agir sur elle le pôle attractif d'un long fil d'acier, fortement aimanté et maintenu verticalement dans le plan du méridien magnétique.

Par des expériences préparatoires on reconnaît

que, pour obtenir le plus grand effet possible, il faut que l'extrémité agissante du fil d'acier *dépasse* de 10 lignes environ le plan horizontal de l'aiguille : on supposera donc que le fil est ainsi disposé.

Dans une première expérience, l'aiguille étant à 4 pouces de distance du fil, elle fait 41 oscillations en 1' ; soit n' la force qui agit sur elle.

Dans une deuxième expérience, l'aiguille étant à 8 pouces de distance, elle fait 24 oscillations en 1' ; soit n'' la force qui agit sur elle. On a

$$\frac{n'}{n} = \frac{(4t)^2}{(15)^2} \quad \frac{n''}{n} = \frac{(24)^2}{(15)^2}$$

La force horizontale du fil est $n' - n$ dans la première expérience, et $n'' - n$ dans la seconde ; et il résulte des deux équations précédentes :

$$\frac{n' - n}{n'' - n} = \frac{(4t)^2 - (15)^2}{(24)^2 - (15)^2} = \frac{1450}{351} = 4, 1.$$

Ainsi, dans la deuxième expérience, où la force est à une distance double, son intensité est à peu près quatre fois plus petite.

Pour de plus grandes distances on trouve la même loi, pourvu qu'on ait soin de corriger les résultats de l'influence du pôle répulsif du fil, qui devient alors sensible.

2°. *Par la torsion.* Il faut aussi, dans cette méthode, employer des fils très longs, afin d'éviter l'influence des pôles qui ne sont pas en présence. Les fils de Coulomb avaient 24-pouces de longueur, sur une ligne $1/2$ de diamètre. Celui de ces fils qui était dans la balance avait une force directrice de 35° de torsion pour 1° de distance (312) ; un second fil pareil, et aussi très fortement aimanté, fut placé verticalement dans la balance, son pôle répulsif en bas, et son extrémité inférieure tombant à un pouce environ au-dessous du niveau de l'autre ; de telle sorte que, si le premier n'eût pas été repoussé, leur point de *recoupement* ou de croisement se serait trouvé à un pouce des extrémités de chacun. Mais le fil suspendu fut classé vivement, et il ne s'arrêta qu'à 24° du méridien magnétique ; c'est ce que nous appelons sa première position. Pour lui en donner une deuxième, le micromètre supérieur fut tourné de trois circonférences ou 1080° et le fil se rapprocha à 17° du méridien. Enfin, pour lui en donner une troisième, le micromètre fut encore tourné de cinq circonférences, ce qui fait en tout huit circonférences ou 2880° , et cette fois il se rapprocha à 12° du méridien.

Dans la première position, l'aiguille suspendue était rappelée dans le méridien par la force terrestre et par la torsion de 24° du fil. Or, la force terrestre étant, comme nous avons dit, de 35° de torsion pour 1° d'écart ; pour 24° elle était de 840° qui donnent, ajoutés à 24, une force totale de 864° .

Dans la deuxième position elle était rappelée par la force terrestre agissant à 17° , et équivalant par conséquent à $35 \times 17 = 595$ degrés de torsion, et par la torsion du fil qui était de $1080 + 17 = 1097$, ce qui fait 1692.

Dans la troisième position, par la force terrestre agissant à 12° , et équivalant à $35 \times 12 = 420$, et par la torsion qui était de $2880 + 12 = 2892$, ce qui fait 3312.

Ainsi, les distances étant 24, 17 et 12, les forces répulsives correspondantes sont 864, 1097 et 1692, ce qui donne à très peu près la raison inverse du carré des distances.

Il est facile de voir comment la même méthode conduirait à déterminer la loi des attractions.

Ces forces, sur lesquelles nous venons d'opérer, sont, il est vrai, des résultantes de toutes les actions partielles du magnétisme des aimants et du magnétisme de la terre ; mais comme des attractions planétaires qui s'exercent sur des masses prodigieuses on a pu déduire les actions de toutes les molécules de la matière pondérable, de même, pour les fluides magnétiques, nous pouvons conclure que la loi des résultantes que nous observons est véritablement la loi élémentaire suivant laquelle toutes les parcelles de substance magnétique se sollicitent l'une l'autre. Ainsi, nous sommes conduits à cette vérité qui doit être le fondement de toute théorie, savoir, que les molécules du même fluide se repoussent, et que les molécules de fluide contraire s'attirent en raison inverse du carré de la distance.

314. *Distribution du magnétisme dans les aimants de différentes formes, et détermination des pôles.* — Les deux méthodes qui viennent de nous conduire à la découverte des lois attractives et répulsives du magnétisme, peuvent nous servir encore à la détermination des intensités magnétiques en chaque point d'une aiguille aimantée.

Une petite aiguille d'épreuve de 6 lignes de longueur, suspendue à un fil de coran, fait 5 oscillations en 1', sous l'influence de la force n , composante horizontale de la terre. On lui présente, à la distance de quelques lignes, un fil aimanté vertical a *(Fig. 278)*, qui ne la détourne point du méridien, mais qui la fait osciller plus vivement ; elle exécute alors n' oscillations en 1' : soit n' la force qui la sollicite. A une petite distance, la section a' qui se trouve vis-à-vis l'aiguille et les sections voisines, telles que a'' et b' , agissent avec toute leur énergie, tandis que les autres agissent avec une obliquité toujours croissante, et par conséquent avec une force toujours moindre. Nous pouvons donc considérer la force actuellement agissante de l'aimant comme appartenant à la section a' . De même, si nous présentons l'aiguille à la même distance, vis-à-vis la sec-

tise π' , nous aurons π'' oscillations en $1'$; π' étant la force qui produit cet effet, nous aurons

$$\frac{\pi' - \pi}{\pi'' - \pi} = \frac{\pi'^3 - \pi^3}{\pi''^3 - \pi^3}$$

Les forces $\pi' - \pi$ et $\pi'' - \pi$ sont les intensités magnétiques de l'aimant, pour les points qui sont en présence de l'aiguille, et nous pouvons de la sorte comparer les intensités des différentes tranches dans toute la longueur des fils ou des barreaux aimantés. Seulement, quand on arrive vis-à-vis l'extrémité A, il faut doubler l'effet obtenu, puisqu'on aurait visiblement un effet double, si l'aimant se continuait encore et donnait au-dessous de A des tranches aussi efficaces que celles qui sont au-dessus. On peut exprimer géométriquement ces résultats en élevant sur les diverses tranches des perpendiculaires qui représentent les intensités observées. Les extrémités de ces perpendiculaires formeront une courbe que l'on appelle la courbe des intensités et qui indique à l'œil toute la distribution des fluides magnétiques. La Fig. 282 représente la courbe trouvée par Coulomb, pour un fil d'acier de la longueur A a. Au milieu l'intensité est nulle, et de là elle va croissant jusqu'à l'extrémité. Pour les fils ou pour les lames de longueur différente, cette courbe est exactement la même, pourvu que la longueur surpasse 6 ou 8 pouces; elle ne fait alors que se transporter vers les extrémités, laissant vers le milieu un espace plus ou moins grand où l'intensité est sensiblement nulle. Il résulte de là cette propriété remarquable : qu'au-dessus de 6 ou 8 pouces de longueur, tous les aimans de même forme ont leurs pôles à la même distance des extrémités; car les pôles n'étant que les points d'application des résultantes totales, ces points sont placés de la même manière, dès que les intensités ou les composantes partielles suivent la même loi.

De plus, Coulomb a fait voir, par le calcul, que les pôles se trouvent à dix-huit lignes des extrémités; et en même temps il a donné, pour les aimans très courts, cette autre loi : que leurs pôles sont à peu près au tiers de la demi-longueur, ou au sixième de la longueur totale, en partant des extrémités. Ce dernier résultat est une sorte de limite dont les pôles s'approchent de plus en plus à mesure que la longueur diminue. Ainsi pour une aiguille de trois pouces, par exemple, les pôles seront à une distance un peu plus grande que six lignes, c'est-à-dire à 7 ou 8 lignes.

Ces résultats supposent que les aimans ont des dimensions transversales très petites par rapport à leur longueur, qu'ils sont d'une forme régulière dans toute leur étendue, et aussi qu'ils sont régulièrement aimantés. Quand ces conditions ne sont pas remplies, on ne peut plus connaître les pôles théoriquement; il faut alors les chercher directement avec la petite aiguille d'épreuve. Dans les losanges, les pôles se rapprochent du centre; dans

les aiguilles en flèche qu'on a coutume d'employer, il est difficile d'avoir une aimantation régulière et des pôles constants; dans les plaques larges ou épaisses par rapport à leur longueur, il y a généralement des pôles multiples ou des points conséquens; enfin, dans les anneaux d'acier très homogènes, on peut obtenir des pôles ou diamétralement ou irrégulièrement opposés; mais l'aimantation régulière ne laisse apercevoir au dehors aucune trace de magnétisme; cette propriété est une conséquence de la théorie dont nous allons essayer de donner une idée.

315. *Théorie du magnétisme.* — Les anciens ne connaissaient de l'aimant que son attraction pour le fer, et c'est sur ce seul fait que pouvaient reposer leurs explications; or, dans tous les siècles, quand on a voulu à toute force expliquer un fait unique en son espèce, on n'a pu faire autre chose que d'exprimer le fait lui-même, par des mots vagues et métaphoriques, ou d'exprimer quelque liaison qu'on lui suppose avec un autre fait plus général. Thalès et Anaxagore disaient donc que l'aimant est doué d'une âme capable d'attirer et de mouvoir le fer; Cornélius Gemma (1535), qu'il y avait entre le fer et l'aimant des fils rayonnans invisibles; d'autres qu'il y avait une sympathie; d'autres une similitude; d'autres une différence de parties : toutes explications qui n'expriment que le fait. Épicure supposait que les atomes de fer conviennent à ceux de l'aimant, et qu'ils s'accrochent; Plutarque imaginait qu'il y avait autour de l'aimant une émanation capable de faire le vide; d'autres aimaient mieux supposer des vapeurs : Cardan prétendait que le fer est attiré parce qu'il est froid, et Costeo de Lodi, médecin, regardait le fer comme la nourriture de l'aimant : en comparant ainsi les phénomènes magnétiques à quelque autre phénomène naturel, on pouvait multiplier les hypothèses, et l'en n'a pas manqué de les multiplier à l'infini. Gilbert fut assez hardi pour condamner toutes ces explications et autres pareilles; en même temps il fut assez bon philosophe pour n'en proposer aucune à leur place. Descartes vint ensuite avec ses tourbillons et sa matière cannelée; comme il expliquait tout, il expliqua le magnétisme; son système fut adopté, et pendant plus d'un siècle il fut couronné dans les ouvrages de ses disciples. Descartes suppose qu'un tourbillon de matière subtile passe rapidement sur la terre, allant de l'équateur vers chacun des pôles; la matière ne l'arrête pas parce qu'elle est poreuse, mais les substances magnétiques ayant des molécules rameuses fort mêlées et tissées ensemble, opposent au tourbillon une résistance plus grande que tous les autres corps; voilà pourquoi elles sont dirigées. Cependant le tourbillon passe plus facilement dans un sens que dans l'autre, car il y a toujours une des extrémités qui se tourne de préférence vers le nord; donc, ajoute Descartes, les pores du fer sont hérissés de poils qui cèdent et se courbent, quand le tourbillon entre par un côté,

mais qui se hérissent quand il veut entrer par le côté opposé. Au lieu de poils on peut concevoir des valves ou un autre empêchement quelconque. Telles sont les idées fondamentales du système par lequel on a expliqué les phénomènes magnétiques jusqu'au temps d'Épinus. Nous ne savons aujourd'hui ce qui doit le plus nous étonner, ou que la puissance d'intelligence de Descartes ait inventé de telles explications, et s'y soit arrêtée, ou que cent ans après ce philosophe, les hommes les plus éminents de leur siècle, comme Euler et Daniel Bernoulli, n'aient pu que reproduire ce système, en le fortifiant de leur autorité et de leur approbation.

Épinus essaya enfin de soumettre au calcul tous les phénomènes magnétiques, et de montrer qu'ils peuvent se déduire des simples lois de l'attraction et de la répulsion; c'était revenir à la vraie méthode expérimentale, et soulever cette espèce de voile dont l'esprit de système enveloppe la réalité des choses. On rapporte qu'après avoir lu l'ouvrage d'Épinus, plusieurs partisans de Descartes ne concevaient plus comment leur intelligence avait pu se prêter à l'invention des molécules rameuses et de la matière cannelée, tant il est vrai que notre conviction peut souvent résulter des combinaisons d'idées les plus extravagantes, et qu'il suffit d'un trait de lumière pour en montrer toute la fausseté.

Épinus n'avait admis qu'un seul fluide magnétique: après lui, et tout en conservant ses principes, on supposa qu'il y avait deux fluides différens; que leur combinaison faisait l'état naturel, et leur séparation l'état magnétique. Mais l'on supposait aussi que ces fluides, une fois séparés, pouvaient librement traverser les corps et se répandre dans leur masse.

Enfin Coulomb posa les vrais principes de la théorie que nous admettons aujourd'hui; il conserva les deux fluides, mais il fit voir que ces fluides ne peuvent éprouver dans les corps qu'un déplacement insensible: c'est ce qui résulte en effet des expériences que nous avons rapportées. Ainsi, nous

supposons 1° que le volume apparent d'une substance magnétique se trouve composé d'une multitude de petits espaces, dans lesquels il y a du magnétisme, et d'une multitude d'autres petits espaces où le magnétisme n'existe pas; 2° que les deux fluides contenus dans chaque petit espace magnétique peuvent être séparés quand la force qui les sollicite est capable de vaincre la force coercitive; qu'ils peuvent s'arranger suivant les lois voulues par l'équilibre, mais qu'ils ne peuvent jamais sortir de la petite étendue dans laquelle ils ont été primitivement enfermés; tout ce qui les environne leur est imperméable.

Les petits espaces où il se trouve du magnétisme s'appellent les *éléments magnétiques*; les petits espaces où il ne s'en trouve pas s'appellent les *éléments non magnétiques*. Nous ne savons pas si les éléments magnétiques sont les intervalles qui séparent les atomes ou s'ils sont les atomes eux-mêmes; et nous ne savons pas non plus s'ils sont des intervalles d'une aggrégation d'atomes, ou d'une molécule secondaire, ou s'ils sont les aggrégations ou les molécules elles-mêmes. La somme des éléments magnétiques et celle des éléments non magnétiques forment le volume apparent d'un corps; le rapport de ces deux sommes peut changer avec la température et avec la nature des substances, et ces changements ont une grande influence sur la distribution et sur l'intensité du magnétisme.

M. Poisson a dernièrement soumis à un calcul rigoureux ces principes de la théorie de Coulomb; les équations générales auxquelles il est parvenu ne peuvent pas encore se résoudre dans tous les cas; mais les conditions particulières sous lesquelles les intégrations sont possibles permettent déjà de nombreuses comparaisons entre les résultats de la théorie et ceux de l'expérience. L'accord est si remarquable que l'on peut dire, sans trop présumer de la savante analyse de M. Poisson, qu'elle reproduit l'ensemble des phénomènes du magnétisme, et qu'ainsi elle donne aux hypothèses de Coulomb une rigueur et une précision satisfaisante.

CHAPITRE IV.

DES PROCÉDÉS D'AIMANTATION, ET DES CAUSES QUI MODIFIENT LA FORCE COERCITIVE.

316. Procédé de Duhamel ou de la touche séparée.

— Ce procédé consiste à disposer bout à bout, sur une même ligne et à une certaine distance (Fig. 287), deux puissans faisceaux, r et r' , dont les pôles opposés se regardent. (On n'a représenté que leurs extrémités; ils sont semblables à celui de la figure 279); sur ces faisceaux, qui restent fixes pen-

dant l'expérience, on place l'aiguille à aimanter de telle sorte qu'elle empiète au plus de 15 à 18 lignes sur chaque extrémité, ou seulement de 7 à 8 lignes, si elle n'a que 3 ou 4 pouces de longueur. Alors on prend les deux barreaux glissants, a et a' , l'un dans la main droite, l'autre dans la main gauche, on les pose au milieu de l'aiguille, on les incline sur elle

de 25 ou 30°, et en les séparant ou les fait glisser sous cette inclinaison, d'un mouvement lent et uniforme, pour qu'ils arrivent en même temps à chacune de ses extrémités; là, on les *relève*, on les rapporte au milieu, et l'on répète la même opération jusqu'à ce que l'aiguille ait reçu le nombre des frictions nécessaires. Quand l'aiguille est trop mince ou trop fragile pour supporter le poids des barreaux glissants, on la soutient par une pièce de bois *t*, sur laquelle on peut même la fixer pour qu'elle n'éprouve aucun déplacement pendant l'opération. Il est évident que chacun des barreaux *a* et *o'* doit toucher l'aiguille par le même pôle que le barreau fixe vers lequel il marche. Ce procédé est le plus avantageux pour aimanter de la manière la plus complète et la plus régulière, les aiguilles de boussole et les lames dont l'épaisseur ne dépasse pas 4 ou 5 millimètres.

317. Procédé d'*Æpinus* ou de la double touche.

— Quand les lames ont une épaisseur plus grande que 4 ou 5 millimètres, la méthode dont nous venons de parler est insuffisante pour les aimanter à saturation, et il est nécessaire alors de recourir au procédé d'*Æpinus*, qui ne diffère du premier que par la disposition et le mouvement des barreaux glissants. Ces barreaux sont encore l'un et l'autre posés au milieu de la lame, chacun la touchant par le pôle de même nom que celui de l'aimant fixe, dont il est le plus voisin (*Fig. 286*) ; mais cette fois leur inclinaison sur elle est seulement de 15 ou 20°, et on les promène *ensemble*, du milieu vers l'une des extrémités, puis de cette extrémité vers l'autre, en parcourant toute la longueur de la lame; puis on revient au milieu, où l'on enlève les barreaux glissants. Si l'on veut donner un plus grand nombre de frictions, il suffit de répéter plusieurs fois le mouvement de *va et vient*, d'un bout de la lame à l'autre, avec la double condition de finir toujours au milieu, et d'y arriver en revenant de l'extrémité de droite, si on a commencé les frictions en allant vers la gauche ou réciproquement; c'est le seul moyen de passer le même nombre de fois sur chaque moitié. Pour rendre cette manœuvre plus commode, on peut fixer les aimans glissants dans une espèce de triangle en bois ou en cuivre; mais, dans tous les cas, il faut avoir soin de laisser entre leurs extrémités inférieures une distance de 5 ou 6 millimètres, qui se conserve toujours la même, au moyen d'une petite lame *t*, de bois, de cuivre ou de plomb.

Ce procédé fut imaginé par *Æpinus*, dont il conserve le nom, et on l'appelle aussi *procédé de la double touche*, parce que les barreaux glissants touchent à la fois la même moitié de la lame qu'on aimante; tandis que dans le procédé de *Bulamel* ils touchent séparément chacune de ses moitiés.

La double touche est préférable à la touche *séparée*, lorsqu'il s'agit d'aimanter des barreaux épais, parce qu'elle y développe une plus grande quantité de magnétisme; mais elle ne doit jamais

être employée lorsqu'il s'agit des aiguilles de boussole ou des lames destinées à des recherches de précision, parce qu'elle présente deux inconvénients qu'il faut alors soigneusement éviter : premièrement, elle donne *toujours* des pôles d'une force inégale; secondement, elle donne souvent des points consécutifs, surtout quand les lames ont une grande longueur. Ces deux inconvénients sont rendus sensibles par des expériences analogues à celles des figures 244 et 254 : dans le premier cas, on voit que la ligne moyenne n'est pas au milieu, et il paraît qu'en général elle se trouve plus près de l'extrémité qui a été touchée la dernière; dans le second cas on aperçoit de petits centres d'attraction, qui font perdre aux courbes de limaille la régularité qu'elles prennent par l'influence des deux pôles.

318. Du point de saturation. — La quantité de magnétisme que prend un corps, va toujours croissant avec la force des barreaux qui servent à l'aimanter; mais la quantité de magnétisme qu'il conserve est susceptible d'une certaine limite, que l'on appelle le point de saturation. Par exemple, une aiguille qui fait seulement 100 oscillations en 100'' lorsqu'on l'aimante avec de faibles barreaux, peut en faire 100 oscillations en 90'', en 80'', en 70'', etc., lorsqu'on l'aimante par l'une ou l'autre des méthodes précédentes, avec des barreaux fixes ou glissants d'une force graduellement croissante. Mais ensuite, abandonnée à elle-même après chacune de ces opérations, elle présente les phénomènes suivants : au-dessous d'une certaine intensité magnétique, par exemple, de celle qui répond à 100 oscillations en 40'', elle conserve tout le magnétisme qu'elle a reçu; c'est-à-dire qu'après des mois ou des années, elle mettra à faire 100 oscillations le même temps qu'elle mettrait immédiatement après l'aimantation; mais les intensités plus grandes, celles qui lui font faire 100 oscillations en 30'' ou en 20'', décroîtront plus ou moins rapidement avec le temps; l'aiguille retombera enfin au point de faire ses 100 oscillations en 40'', et cette limite d'intensité sera son point de saturation. Il est évident, d'après cela, que le point de saturation d'une lame ou d'une aiguille ne dépend que de sa force coercitive, et nullement de la force des aimans qui ont servi à développer son magnétisme.

On prétend en général, que les corps *sursaturés* de magnétisme, retombent immédiatement au point de saturation; mais dans le cours de mes recherches magnétiques, j'ai pu observer des corps très variés dans leur nature, dans leurs dimensions et dans les degrés de leur force coercitive, et j'ai toujours éprouvé que le point de saturation n'est pas une limite aussi fixe qu'on le suppose : premièrement, il y a toujours après l'aimantation une réaction des fluides, qui change leur arrangement, et qui augmente quelquefois d'intensité magnétique; secondement, les aiguilles sursaturées

turées perdent très lentement l'excès de leurs fluides, et il n'est pas rare, après plusieurs mois, de les voir encore éprouver quelques légères variations. Il est inutile d'ajouter qu'il faut dans ces observations tenir compte des changements de température, et des autres causes accidentelles qui pourraient avoir de l'influence sur les intensités magnétiques.

Pour reconnaître qu'une aiguille est aimantée à saturation, il n'y a d'autres moyens que de la *réaimanter dans le même sens*, avec des barreaux plus puissants que ceux qui l'ont aimantée la première fois. Si elle prend alors une intensité beaucoup plus grande, ce dont on s'assure par l'une des méthodes que nous avons indiquées (311 et 312), il est certain qu'elle n'était pas saturée, et si elle ne prend qu'une faible augmentation d'intensité, qu'elle perd ensuite avec le temps, ce sera une preuve qu'elle était portée au point de saturation.

Il ne faudrait pas croire que l'on peut augmenter indéfiniment l'intensité magnétique d'une aiguille, en lui donnant un grand nombre de frictions avec de faibles barreaux : passé un certain terme, les nouvelles frictions n'ajoutent rien, et ce terme arrive quand la résistance de la force coercitive est égale à la puissance décomposante des barreaux.

Il ne faudrait pas croire non plus qu'une aiguille aimantée par de puissants barreaux, pût, sans inconvénient, être réaimantée ensuite par des barreaux glissants, d'une moindre intensité ; car ceux-ci, même quand ils agissent dans le même sens que les premiers, lui font perdre peu à peu de son magnétisme, et le ramènent enfin au degré d'intensité qu'ils auraient pu lui donner. Cet effet remarquable est une nouvelle preuve que les barreaux glissants ne magnétisent qu'en déterminant, dans chaque molécule, des décompositions et des recompositions successives des deux fluides.

319. *De l'influence de la trempe sur la force coercitive.* — Le plus sûr moyen de tremper l'acier à divers degrés comparables entre eux, est de lui donner d'abord la *trempe la plus dure*, et ensuite de le *recuire* graduellement, jusqu'à un point déterminé, en sorte que les *divers degrés de trempe* ne sont véritablement que les *divers degrés de recuit*.

Pour donner à un barreau d'acier la trempe la plus dure, on le chauffe jusqu'au rouge *cerise clair*, ou jusqu'au rouge *blanc*, et on le jette rapidement dans une grande masse d'eau froide. Le prompt refroidissement fait la trempe ; ainsi, pour qu'il reçoive une trempe égale, et pour qu'il ne se *tourmente* pas, il importe que le froid l'enveloppe et le saisisse instantanément dans toutes ses parties. On peut tremper l'acier dans l'huile, dans le suif, dans le mercure, dans la glace, dans des dissolutions de différentes substances, ou même dans les mélanges réfrigérants : ces divers

modes du refroidissement paraissent avoir de l'influence sur les propriétés mécaniques des ressorts, des tranchans ou des pointes, mais ils ne paraissent pas modifier sensiblement les propriétés magnétiques de l'acier.

Pour *recuire* l'acier trempé, on le chauffe uniformément sur un lit de charbon pulvérisé, ou simplement concassé en fragmens plus ou moins gros, suivant le recuit que l'on veut obtenir. La grande difficulté est de mesurer alors les divers degrés de chaleur ; mais l'acier joint d'une propriété remarquable, qui permet d'évaluer avec assez d'approximation la température qu'il éprouve. Lorsqu'on le chauffe de la sorte, sa surface prend de vives couleurs qui se succèdent assez lentement, à mesure que la chaleur augmente : d'abord, au brillant éclat du métal succède une nuance de jaune clair ou *jaune paille* ; à une température un peu plus haute cette nuance tourne à l'*orangé*, puis à l'*orangé foncé*, ensuite au *rouge violet*, puis au *bleu vif*, puis à une couleur verdâtre, très éclatante, que l'on appelle *couleur d'eau*. Ces nuances, parfaitement distinctes, correspondent à des températures qui ne sont pas évaluées en degrés centigrades, mais qui sont telles, sans doute, qu'il existe plus de deux ou trois cents degrés de différence entre le jaune paille et la couleur d'eau. La première de ces nuances paraît répondre à peu près à 200°, et la seconde à environ 450° : ensuite, on peut pousser le recuit jusqu'au *rouge sombre*, au *rouge*, au *rouge cerise*, au *rouge cerise clair*, et au *rouge blanc* qui fait disparaître toute espèce de trempe, quod ad sortir de cette température l'acier se refroidit librement dans l'air.

Pour déterminer maintenant l'influence de la trempe, on prend une lame d'acier, on la trempe au rouge blanc, on l'aimante à saturation, et l'on observe ensuite le ressort qu'elle met à faire 100 oscillations ; puis on la recuit successivement jusqu'au jaune paille, à l'orangé foncé, au bleu et à la couleur d'eau, etc., en la retirant après chaque degré de recuit, pour l'aimanter à saturation, et lui faire faire 100 oscillations dont on observe la durée. Il est évident que les diverses intensités magnétiques de cette lame seront entre elles en raison inverse des carrés des temps observés. C'est ainsi que l'on arrive à constater par l'expérience, 1° que les lames qui ont reçu la trempe la plus dure sont données de la plus grande force coercitive, et prennent par conséquent la plus grande intensité magnétique, lorsqu'on les aimante avec des barreaux assez puissants. 2° Que les lames recuites au bleu des ressorts, ou même à la couleur d'eau, conservent assez de force coercitive pour prendre une grande intensité magnétique. Or, l'acier trempé dur étant cassant comme du verre, il y a toujours de l'avantage à recuire les aiguilles jusqu'au bleu, puisqu'on ne perd que peu de chose en intensité magnétique, et que l'on évite ainsi tous les accidens qui pourraient provenir d'une

ropture, ou de quelques changements de forme.

Il faut cependant remarquer que l'acier ne se comporte pas toujours comme nous venons de le dire; quelquefois il prend inévitablement des points conséquens lorsqu'il est trempé dur, d'autres fois il ne prend le maximum d'intensité magnétique qu'après avoir été recuit jusqu'au rouge sombre, ou même jusqu'au rouge.

320. Influence de la chaleur sur le magnétisme.

— Nous avons déjà dit qu'un aimant artificiel ou naturel, chauffé jusqu'au rouge blanc, perd complètement son magnétisme, de telle sorte qu'il n'est plus, après le refroidissement, qu'un corps inerte, sans force directrice et sans force magnétique; cette observation est fort ancienne, elle avait été faite par Gilbert. Mais en perdant ainsi leurs fluides libres, ces corps ne perdent pas la propriété de redevenir magnétiques, lorsqu'on les aimante de nouveau par les procédés que nous avons fait connaître; seulement leur force coercitive est changée: celle des aimans naturels est diminuée sans qu'on puisse la reproduire, et celle des aimans artificiels est détruite jusqu'à ce qu'elle ait été rétablie par une nouvelle trempe. Cette reconstitution du magnétisme, par l'influence de la chaleur, ne se fait pas subitement à la température rouge: elle se fait graduellement à mesure que la température s'élève. Pour s'en assurer on prend un barreau aimanté, dont on observe la force, en comptant la durée d'un certain nombre d'oscillations; puis on le porte successivement à divers degrés de chaleur, et à chaque fois on le laisse refroidir, pour observer de nouveau son intensité magnétique; toutes ces intensités forment une série décroissante, depuis le point de départ jusqu'à la plus haute température à laquelle on arrive. M. Kupffer, qui a fait des observations très exactes sur ce sujet, explique d'une manière satisfaisante tous les résultats qu'il a obtenus, en supposant que chaque degré d'élévation de température augmente de la même quantité la durée d'un même nombre d'oscillations. Par exemple, de 0 à 30° R., chaque degré de température augmente d'une demi-seconde la durée de 300 oscillations d'une aiguille qui fait, à 10°, 300 oscillations en 784",5. Mais les expériences ne comprennent pas encore, jusqu'à présent, une assez grande étendue de l'échelle thermométrique, pour qu'on puisse appliquer cette loi avec une entière confiance.

M. Kupffer a aussi remarqué qu'il faut un temps très long, pour qu'une température donnée achève sur un barreau toute la reconstitution qu'elle est capable de produire. Par exemple, une aiguille qui a été plongée à plusieurs reprises dans l'eau bouillante, où elle restait 10' à chaque fois, n'a perdu qu'à la sixième immersion tout le magnétisme qu'elle pouvait perdre. D'abord elle ne mettait que 578" à faire 200 oscillations; après la 1^{re} immersion elle mettait 637",5; après la 2^e, 642; après la 3^e, 645; après la 4^e, 647; après la 5^e,

650,5; après la 6^e, 652, et aussi 652 après la 7^e.

Voici un autre effet de la chaleur, auquel on n'a pas fait assez d'attention: à la température du rouge cerise, les aimans, l'acier et le fer perdent non-seulement le magnétisme libre qu'ils peuvent posséder, mais de plus ils deviennent incapables d'en recevoir la moindre trace; pendant tout le temps qu'ils sont soumis à cette température, ils paraissent comme du bois ou de la pierre, tout-à-fait insensibles à l'action décomposante des plus forts barreaux. Ainsi les aimans, l'acier et le fer ont une *limite magnétique*, et cette limite se trouve à peu près vers la température du rouge cerise.

Quelques analogies assez remarquables entre les distances des atomes des corps et leurs propriétés magnétiques m'avaient conduit à penser que la limite magnétique des différens corps devait se trouver à des températures très différencées, et j'ai, en effet, démontré par l'expérience: 1° que le cobalt ne cesse jamais d'être magnétique, ou plutôt que sa limite magnétique est à une température plus haute que le rouge blanc le plus éclatant; 2° que le chrome a sa limite magnétique un peu au-dessous de la température rouge sombre; 3° que le nickel a sa limite magnétique vers 350°, à peu près à la température de la fusion du zinc; 4° enfin, que le manganèse a sa limite magnétique à la température de 20 à 25° au-dessous de 0.

Les expériences sur les cinq corps simples magnétiques, le manganèse, le nickel, le chrome, le fer et le cobalt, semblent prouver 1° que la chaleur n'agit sur le magnétisme que par la distance plus ou moins grande qu'elle détermine entre les atomes des corps; 2° que toutes les substances deviendraient magnétiques si l'on pouvait, par une action quelconque, rapprocher leurs atomes à une distance convenable.

Voilà à peu près tout ce que nous connaissons jusqu'à présent des influences de la chaleur sur les fluides magnétiques; il faut espérer qu'un si beau et si vaste sujet de recherches ne sera pas longtemps négligé, et que bientôt on en pourra faire sortir quelque découverte fondamentale.

321. Des causes qui peuvent aimanter les substances magnétiques.

— Nous venons de voir que la chaleur est une cause très efficace pour déterminer la reconstitution du magnétisme libre, mais elle est tout-à-fait impuissante pour déterminer la séparation des fluides, du moins il a été impossible jusqu'à ce jour d'obtenir par la chaleur la moindre trace d'aimantation, même dans les corps où l'équilibre magnétique est le plus facile à rompre. Ainsi, le magnétisme et la chaleur sont des agens naturels qui paraissent n'avoir aucune prise directe l'un sur l'autre.

La lumière ne paraît pas plus efficace que la chaleur pour déterminer une séparation des fluides magnétiques. Il est vrai que quelques observateurs, et particulièrement M. Morichini, ont cru reconnaître un pouvoir magnétisant dans les rayons so-

laire; mais j'ai apporté beaucoup de soins à répéter ces expériences sans découvrir aucune action sensible; MM. Reiss et Moser n'ont pas été plus heureux. (*Annales de chim. et de phys.*, T. XLII, page 304.)

Il n'en est pas de même de l'électricité; elle agit sur le magnétisme avec une puissance remarquable. C'est la découverte de cette action qui a fait naître l'électro-magnétisme, branche nouvelle de la science que nous devons étudier dans l'un des livres suivants, et qui a reçu en peu d'années d'immenses développemens.

322. *Des aimans artificiels et naturels.* — Nous avons déjà dit qu'on appelle en général aimans naturels, les substances qui sont aimantées au sortir du sein de la terre, et aimans artificiels toutes les substances dans lesquelles nous parvenons, par nos procédés, à fixer du magnétisme. Un aimant naturel, échauffé au rouge, et réaimanté après cette opération, serait un véritable aimant artificiel. En donnant les procédés d'aimantation (316 et 317) et les moyens de changer et d'augmenter la force coercitive, nous avons donc donné les méthodes d'après lesquelles les aimans doivent être composés; nous n'avons plus à présent qu'à faire connaître comment on peut les conserver, et comment on peut les assembler pour augmenter leur puissance.

Les aiguilles, les lames et les barreaux de toute espèce sont des aimans d'une seule pièce, qui, étant une fois aimantés à saturation, conservent très bien leur magnétisme; cependant les lames et les barreaux peuvent être disposés de différentes manières à l'égard de la force terrestre, cette force peut, dans des circonstances favorables, déterminer une recombinaison partielle des fluides. Par exemple, dans nos climats, un barreau qui serait tenu verticalement, son pôle horéal en bas, éprouverait une diminution magnétique; et si dans cette position il recevait quelques chocs ou quelques coups de marteau, il pourrait en peu de temps être réduit à une force très faible, ou même prendre des pôles contraires. C'est pour empêcher ces recombinaisons que l'on emploie les *armatures*. On appelle en général *armures* ou *armatures* des pièces de fer doux, qui sont mises en contact avec les aimans pour maintenir leur activité, par la décomposition magnétique qu'elles éprouvent. Pour armer des barreaux, on les dispose parallèlement dans des boîtes, de manière que les pôles contraires se correspondent, et aux deux extrémités on ajoute transversalement deux prismes quadrangulaires de fer doux, qui complètent le parallélogramme. Chacune de ces pièces de fer devient ainsi un aimant qui réagit sur les barreaux pour y fixer les fluides décomposés.

Les aiguilles qui sont en activité ne peuvent point recevoir d'armature; mais elles n'en ont pas besoin puisqu'elles se tournent sans cesse pour obéir à la force qui les sollicite; c'est cette force elle-même qui leur sert d'armature.

Les *faisceaux magnétiques* sont des assemblages de plusieurs lames, dont les armatures exigent beaucoup plus de soin. La figure 270 représente un faisceau construit d'après les méthodes de Coulomb: il se compose de 15 lames rectangulaires, disposées en 3 couches de chacune 5 lames. Les lames de la couche supérieure et celles de la couche inférieure sont plus courtes de 2 pouces et demi ou 3 pouces, que celles de la couche moyenne; ce qui donne à chaque extrémité un retrait de 15 ou 18 lignes. Toutes ces lames, qui sont du reste pareilles dans leurs dimensions, s'ajustent dans les pièces de fer, qui servent d'armature; un lien en cuivre *cc'*, les retient à chaque bout et les presse de manière que le système entier soit parfaitement immobile. Ces grands faisceaux sont destinés à être fixes lorsqu'on s'en sert pour aimanter; on construit, sur les mêmes principes, des faisceaux glissants qui ont une moindre longueur et qui ne se composent que de 6 ou 9 lames.

La figure 271 représente un aimant en fer d'éclat; c'est un assemblage de plusieurs lames, qui sont immédiatement superposées. Après les avoir trempées, on les recuit, et on les dresse de manière qu'elles puissent s'appliquer exactement l'une sur l'autre; deux vis *v* et *v'*, en fer ou en cuivre, les retiennent dans cette position. Ces lames sont aimantées séparément avant d'être assemblées; pour cela on les met en prise, aux deux bouts, avec les pôles contraires de deux puissans barreaux, et en partant du milieu ou du sommet de la courbure, on fait, par la méthode de la double touche, autant de frictions qu'il est nécessaire. Un anneau *an'* sert à suspendre l'aimant, et une pièce de fer doux *pp'*, qu'on appelle le *portant* ou le *contact*, reste toujours en prise avec les deux pôles contraires *a* et *a'*. Le portant n'a en général que le tiers de l'épaisseur de l'aimant, et il est légèrement arrondi sur sa surface de contact, de telle sorte qu'il ne touche l'aimant que par une seule ligne. Les aimans bien faits peuvent soutenir, au moyen du portant, jusqu'à 10 ou 20 fois leur poids.

Les armatures des aimans naturels sont représentées dans les figures 269 et 270. Les parties *z*, *z'* sont les ailes de l'armature, et les parties *r*, *r'* en sont les *piéds*. On donne aux ailes une largeur égale à celle de l'aimant, et une épaisseur d'environ une ligne; les dimensions des piéds dépendent de la force de l'aimant, et ce n'est que par des essais successifs que l'on peut arriver à la forme et à la grandeur la plus convenable. La figure 273 représente une projection horizontale de l'aimant armé; on y voit le lien de cuivre *cc'*, qui presse les armatures sur les extrémités polaires de l'aimant.

On a observé sur les aimans naturels un phénomène dont il n'existe aucune explication plausible: c'est la *faiblesse* qu'ils éprouvent lorsqu'en les *surcharge*. Supposons qu'un aimant puisse porter 20 kilogrammes assez facilement, si on le charge de ces 20 kilogrammes, et que chaque jour on y

ajoute un petit poids, on pourra graduellement augmenter la charge, au point de la porter à 30, ou peut-être à 40 kilogrammes. Mais dès que le contact se détache, entraîné par l'excès du poids, il est impossible de le faire reprendre : l'aimant ne veut plus *mordre*, et il faut revenir à une charge moindre que les 20 kilogrammes du point de départ, pour que l'aimant la puisse porter, cependant avec des précautions et du temps en parviendra à le *nourrir* de nouveau, et à lui rendre sa première vigueur.

Lorsqu'on lien d'aimanter des aiguilles ou des prismes, on aimante des lames très larges et peu épaisses, il est facile d'y varier la distribution magnétique d'une infinité de manières, et prenant, par exemple, des plaques de tôle d'acier de 8 ou 10 pouces carrés et de 1 ligne ou 1/2 ligne d'épaisseur, et en traçant sur leur surface avec un aimant assez fort, des figures quelconques, on peut rendre ces figures apparentes en répandant de la fine limaille de fer avec un tamis, sur la face aimantée de la plaque (Fig. 285). M. de Haldat vient de publier un mémoire intéressant sur ce sujet. (*Ann. de Phys. et de Chim.*, t. XLII, pag. 33.) Les figures deviennent plus saillantes sur les plaques étamées, et pour les faire disparaître il suffit de chauffer jusqu'à la fusion de l'étain.

323. Historique des divers procédés d'aimantation.

— Pendant long-temps on a aimanté les aiguilles de boussole en les passant dans toute leur longueur sur le pied d'un aimant naturel (Fig. 280). En 1746, Knight fit connaître un procédé plus efficace et plus conforme à la théorie : Knight mettait des barreaux bout à bout dans la même ligne, et se touchant par le pôle contraire : l'aiguille à aimanter reposait sur ces barreaux, moitié sur l'un, moitié sur l'autre, et en les retirant elle était frottée par chacun d'eux dans la moitié de sa longueur.

Le même physicien eut aussi l'heureuse idée de réunir plusieurs aiguilles aimantées de cette manière, pour en former des faisceaux puissants. Un peu plus tard, Anthéaume et Duhamel firent de nombreux essais pour découvrir la méthode de Knight, on peut en inventer une meilleure, et c'est à ces physiciens que nous devons le procédé de la *touché séparée*; seulement ils se contentaient de mettre des prismes en fer, au lieu des barreaux fixes que nous employons maintenant. A peu près à la même époque, Mitchell et Canten inventaient en Angleterre la méthode de la *double touché*; mais l'influence des barreaux fixes avait aussi échappé à leur sagacité : ce fut *Æpius* qui en montra l'avantage en 1758, et Combe qui les employa le premier, avec la méthode de Duhamel, en 1780.

CHAPITRE V.

DU MAGNÉTISME EN MOUVEMENT, ET DE QUELQUES PHÉNOMÈNES SINGULIERS D'ATTRACTION ET DE RÉPULSION.

324. De la force magnétique des disques tournans.

— C'est à M. Arago que nous devons la découverte de cette nouvelle force magnétique : il avait remarqué que la présence du cuivre diminue rapidement l'amplitude des oscillations d'une aiguille aimantée, sans en changer sensiblement la durée; et ce phénomène est devenu entre ses mains une source féconde en résultats. Le cuivre en repos exerce une action sur l'aiguille en mouvement; M. Arago a supposé d'abord, que le cuivre en mouvement devait agir à son tour, avec plus ou moins d'énergie, sur l'aiguille en repos, et il a été conduit de la sorte à des phénomènes d'une telle intensité, qu'il lui a été facile de les varier de mille manières, et d'en poser les lois fondamentales.

L'appareil qu'il a employé dans ses recherches est représenté dans les figures 288, 289, et 290. n (Fig. 288) est une horloge toute en cuivre, excepté deux ou trois petits pivots qui sont en acier : elle est portée sur un trépied en bois, très solide, qui peut être mis daplomb au moyen de trois vis calantes. Cette horloge est destinée à imprimer un

mouvement de rotation très rapide à un axe vertical x (Fig. 290); l'axe communique le mouvement à une pièce tt' à trois branches, qui est représentée plus en grand dans la figure 289; c'est sur cette pièce que l'on ajuste les disques qui doivent servir aux expériences; ils se centrent d'eux-mêmes, au moyen d'un petit trou qui reçoit le prolongement de l'axe de rotation, et ils sont arrêtés à leur contour, sur les branches de la pièce tt' , par une petite pièce mobile que serre une vis de pression. On peut mettre à volonté trois velans v qui s'inclinent plus ou moins, suivant le degré de vitesse auquel on veut s'arrêter. Reste à présent à soumettre l'aiguille à l'influence du disque tournant. Pour cela on place autour de l'horloge une table à quatre pieds rr' , qui porte un plateau pp' , percé en son centre d'une ouverture un peu plus grande que les disques. A la partie inférieure de ce plateau, on colle une feuille de papier ll' (Fig. 290), et sur sa face supérieure on pose une cloche c , dans laquelle on suspend l'aiguille yy' , au moyen d'un fil de soie f . L'aiguille peut être élevée ou abaissée en

tournant le treuil *t* dans un sens ou dans l'autre.

Le poids de plomb *r* met l'horloge en mouvement; un bouton sert à l'arrêter, et un compteur indique le nombre des tours, qui peut être de 8 à 10 par seconde; il y a même un timbre qui sonne à chaque centaine, et, par là, on peut aisément reconnaître l'instant où la vitesse de rotation est devenue à peu près uniforme. Cet appareil a été exécuté avec beaucoup d'intelligence et de précision par M. Perrelet, l'un de nos plus habiles horlogers.

Voici maintenant les phénomènes que l'on observe: tout étant en repos, et l'aiguille dirigée dans le méridien magnétique, on tourne le bouton d'arrêt, et le disque entre en mouvement; sa vitesse de rotation est d'abord très petite, mais elle prend une accélération rapide, et bientôt l'aiguille est déviée comme si elle tendait à suivre le disque dans ses révolutions successives. Cependant cette force d'entraînement est balancée en partie par la force magnétique de la terre, qui rappelle l'aiguille dans le méridien; de telle sorte que le rapport de ces forces détermine la position d'équilibre. La force entraînant le disque croît avec sa vitesse de rotation: par conséquent, pour une faible vitesse, l'aiguille s'arrête, par exemple, à 10° de déviation; pour une vitesse plus grande à 20°; et l'on peut ainsi, en modifiant les vitesses et en les soutenant uniformes, arrêter l'aiguille dans toutes les positions obliques à l'égard du méridien, depuis 0 jusqu'à 90°. Mais dès que la vitesse est assez grande pour entraîner l'aiguille au-delà de cette déviation de 90°, il n'y a plus de point de repos: l'aiguille tourne avec le disque, et tend à prendre elle-même toute la vitesse de rotation dont il est animé. Telle est la force magnétique toujours croissante que prennent les corps en mouvement. Essayons de voir comment cette force varie en intensité, par rapport à la distance, et comment elle se dirige par rapport à la surface du disque.

1°. Cette force décroît à mesure que la distance augmente; car l'aiguille, qui tourne d'un mouvement continu lorsqu'elle n'est séparée du disque que par l'épaisseur de la feuille de papier qui ferme le cloche, n'éprouve plus, lorsqu'on la soulève graduellement, que des *déviation*s *déterminées*, diminuant toujours à mesure que la distance devient plus grande. Il est bien entendu que la vitesse de rotation du disque reste la même dans toutes ces éprouves comparatives.

2°. La force que nous observons dans les expériences précédentes est évidemment *perpendiculaire aux rayons du disque, et parallèle à sa surface*. Il importe d'examiner si elle est la seule force qui résulte du mouvement; pour cela M. Arago a fait l'expérience suivante: une aiguille aimantée est suspendue verticalement par un fil, à l'extrémité d'un fil d'une balance, et équilibrée de l'autre côté par des poids quelconques; sous l'extrémité inférieure de cette aiguille, on fait tourner un dis-

que de cuivre, et l'on observe une répulsion: donc il résulte aussi du mouvement *une force répulsive, perpendiculaire à la surface du disque*. Cette même expérience se peut faire avec une aiguille d'inclinaison, rendue horizontale par un contre-poids, et dont une extrémité seulement est approchée au-dessus du disque tournant.

3°. Enfin il y a une troisième force, agissant *dans le sens des rayons du disque*, et parallèlement à sa surface. Pour le faire voir, M. Arago dispose une aiguille d'inclinaison, de manière qu'elle soit verticale, et que son plan de rotation passe par le centre du disque; alors, en la déplaçant sur un même rayon, la pointe de l'aiguille peut correspondre à tous les points de ce rayon ou de son prolongement. Or, quand la pointe de l'aiguille tombe au dehors du disque elle est repoussée loin du centre de rotation; cette force répulsive diminue à mesure qu'on avance l'aiguille vers le centre; elle est nulle à une certaine distance, et se change ensuite en force attractive, pour redevenir nulle au centre lui-même.

Ainsi, sur chaque rayon du disque il y a un point entre la circonférence et le centre, où la force dont il s'agit est nulle; au-delà elle est répulsive, et plus près du centre elle est attractive. C'est ce qui est indiqué dans la *figure* 291, où les lignes ponctuées marquent les directions primitives de l'aiguille.

Après avoir reconnu l'existence de ces trois forces, M. Arago a cherché leurs rapports d'intensité, et il arrive à cette conséquence remarquable, que ces rapports changent avec la vitesse de rotation.

Toutes les substances ne prennent pas, par le mouvement, la même énergie magnétique: les métaux sont à cet égard doués d'une puissance beaucoup plus grande que les autres corps, et plusieurs physiiciens, en répétant ces expériences, n'ont pas obtenu d'effet sensible avec le verre, le bois, l'eau, etc.

MM. Herschell et Babbage, dans un très beau travail sur ce sujet, établissent l'ordre suivant, pour l'action de différents métaux. Celle du cuivre est prise pour unité.

Cuivre	1	Zinc	0,93
Étain	0,46	Antimoine	0,09
Plomb	0,25	Bismuth	0,02

L'argent paraît doué d'une grande force; l'or d'une très faible, le mercure se place entre l'antimoine et le bismuth.

Lorsqu'un disque offre des solutions de continuité ou des fentes dans le sens de ses rayons, il perd une grande partie de sa force; et l'on doit aussi à MM. Herschell et Babbage cette remarque curieuse, qu'en ressoudant les bords avec un métal quelconque, même avec du bismuth, quand le disque est de cuivre, on lui rend presque la totalité de la force qu'il avait perdue. Mais en remplissant seulement ces intervalles avec des poudres

métalliques bien pressées, ou avec des liquides tels que l'eau ou l'acide sulfurique, ou ne parvient pas à réparer sensiblement ses pertes d'intensité.

Enfin MM. Herschell et Babbage ont encore constaté les deux faits suivants : 1^o que les écrans de substances non magnétiques (c'est-à-dire non-magnétiques à la manière du fer ou de l'acier) n'exercent aucune influence lorsqu'on les place entre l'aiguille aimantée et les disques tournants ; 2^o qu'un disque en mouvement n'a aucune puissance pour entraîner un disque en repos ; ce qui prouve que ce n'est pas le mouvement lui-même qui décompose les fluides magnétiques, et qu'il n'agit que pour agrandir les effets des fluides préalablement décomposés.

M. Barlow a constaté que le fer en mouvement agit à la manière des autres métaux, mais avec beaucoup plus d'énergie ; nous regrettons que les phénomènes qu'il a observés soient trop compliqués pour qu'il nous soit possible de donner ici l'extrait du mémoire qu'il a publié sur ce sujet. (*Philosophical Transactions*, 1825.)

M. Poisson a donné une théorie du magnétisme en mouvement, dont nous ne pouvons indiquer que les principes (*Ann. de Phys. et de Chim.*, tome XXXII, page 225). Il suppose que dans chaque *élément magnétique* il y a, outre la *force coercitive*, une autre *force* analogue à la résistance des milieux, qui *retarde* le mouvement des molécules de fluide austral et de fluide boréal. Cette *résistance* est indépendante de la force coercitive ; elle peut varier avec la nature des substances, avec leur température, ou avec l'arrangement de leurs molécules ; ses effets sont insensibles lorsque les corps sont sollicités par une force magnétique qui resté la même en grandeur et en direction, parce que, avec le temps, les fluides peuvent se déplacer et venir à la surface des éléments, s'arranger suivant les lois de l'équilibre. Mais quand la force magnétique change rapidement, la résistance qu'ils éprouvent détermine un tout autre arrangement, et alors ils peuvent être dispersés suivant des lois très variables, dans toute l'étendue de l'élément magnétique, et par conséquent produire au dehors des effets complètement différents par leur intensité. Cette hypothèse, à laquelle M. Poisson est arrivé par des vues profondes et tout-à-fait neuves sur la théorie du magnétisme, ne rend pas raison des phénomènes d'une manière vague et incertaine : transformée en calcul et réduite en formules, elle reproduit tous les résultats de l'expérience ; elle les analyse et les enchaîne d'une manière surprenante, et même elle a conduit M. Poisson à prédire des phénomènes qui, depuis, ont été confirmés par l'expérience.

325. Les effets magnétiques des disques tournants sont liés aux modifications qu'éprouve l'aiguille aimantée lorsqu'elle oscille en présence des différents corps. M. Poisson retrouve cette liaison

dans ses formules, ou plutôt il l'établit d'une manière précise. Voilà donc deux ordres de phénomènes, et deux carrières nouvelles qui nous ont été ouvertes par les deux expériences fondamentales de M. Arago. L'action des différents corps sur l'amplitude des oscillations de l'aiguille aimantée a été étudiée par MM. Arago, Nobili et Baccelli, Seebeck et Baumgaertner (voyez le *Bulletin des Sciences*, de M. de Férussac, septembre 1826, août 1826, août 1827 et octobre 1827). Nous nous contenterons de rapporter ici les résultats de M. Seebeck, comme étant les plus complets et les mieux constatés. M. Seebeck a fait osciller une aiguille de 2 pouces et 1/8 de longueur, à 3 lignes de distance de différentes plaques métalliques, et il a observé le nombre des oscillations qui devaient se faire pour que l'amplitude fût réduite de 45° à 10°. Voici dans ces circonstances, le nombre des oscillations, l'épaisseur des plaques et la nature de leur substance :

Nombre des oscill.	Épaisseur des plaques.	Substances.
116	2 lig.	Marbre.
112	2,0	Mercur.
106	2,0	Bismuth.
94	0,4	Platine.
90	2,0	Antimoine.
89	0,75	Plomb.
89	0,2	Or.
71	0,5	Zinc.
68	1,0	Étain.
62	2,0	Laiton.
62	0,3	Cuivre.
55	0,3	Argent.
6	0,4	Fer.

Il paraît aussi, d'après M. Seebeck, qu'en alliant les substances magnétiques à d'autres qui ne le sont pas, on peut former des composés qui n'exercent aucune action sur l'aiguille aimantée. Tels seraient par exemple, l'alliage de 1 partie de fer et 4 d'antimoine, et celui de 2 parties de nickel avec 2 parties de cuivre.

326. Coulomb avait fait connaître à l'Institut, en 1812, une série de phénomènes qui probablement ne sont pas sans liaison avec les phénomènes précédents. Sous une cloche en verre (*Fig. 294*), il suspendait par un fil de cocon de petites aiguilles très fines, de 6 à 8 millimètres de longueur, et composées de substances quelconques, organiques ou inorganiques ; deux forts barreaux étaient disposés pour s'avancer, par leurs pôles contraires A et a, jusqu'à une petite distance des extrémités de l'aiguille suspendue, et dès qu'ils arrivaient assez près, l'aiguille sentait leur influence, car elle se dirigeait dans la ligne des pôles, et se mettait ensuite à faire des oscillations plus ou moins rapides. Des barres non aimantées ne produisaient point cet effet ; donc il y a, dans ces circonstances, une action magnétique sur tous les corps de la nature,

car il n'en est pas un seul qui ne se dirige et ne fasse des oscillations. Reste à savoir maintenant si tous les corps contiennent du fer, du cobalt, du chrome ou du nickel, et si quelques atomes de ces substances, tout-à-fait imperceptibles par les analyses chimiques, ne seraient pas capables de leur donner cette propriété attractive. Pour s'en assurer, Coulomb fit des mélanges artificiels, et des alliages de fer en très petites proportions; et comparant leurs effets par ces méthodes ingénieuses et précises qui lui étaient si familières, il fut conduit à cette conséquence, que, si les substances magnétiques étaient la vraie cause de ces phénomènes, elles devaient du moins être en si faibles proportions que l'analyse chimique serait tout-à-fait impuissante pour les découvrir.

327. M. Lebaillif a eu dernièrement l'ingénieuse idée de composer, avec de petites aiguilles magnétiques, un système très délicat et très sensible, avec lequel il a découvert des forces dont on était loin de soupçonner l'existence. Son appareil, qu'il appelle *sidéroscope*, est représenté dans la *figure 292*; il se compose d'un brin de paille de 12 à 15 pouces de longueur, dans lequel on ajuste trois fines aiguilles à condre, aimantées à saturation : l'une, *a b*, est simplement glissée dans le tuyau, et les deux autres, *a' b'* et *a'' b''*, sont plantées au travers

de la paille, de manière que leurs pôles contraires se correspondent : ce système est porté par un petit étrier de papier, qui s'attache à un fil de cocon. La portion *m* *h* est la plus longue, et c'est au-dessous de son extrémité que l'on place sur le fond de la cage un arc *r r'*, divisé en degrés et demi-degrés; la portion *m* *e* n'a point de force directrice, puisque l'action de la terre se détruit d'elle-même sur les deux aiguilles opposées, *a' b'* et *a'' b''*; en sorte que l'on pourrait, à la rigueur, supprimer ces aiguilles. Mais la portion *m* *h* a une force directrice dépendante de l'aimantation de l'aiguille *b a*, de sa longueur et de sa distance au point de suspension. Une petite porte à coulisse *t p*, percée d'une ouverture *t*, complète la fermeture de l'appareil; quand on veut faire une expérience, on la fait glisser pour amener l'ouverture vis-à-vis l'extrémité de l'aiguille. Presque tous les corps que M. Lebaillif a présentés au sidéroscope, exercent quelque action sur l'aiguille. La plupart de ces actions peuvent sans doute être attribuées à quelques atomes de fer : cependant il ne faudrait pas conclure que, dans ces phénomènes, la force magnétique est la seule qui soit en jeu; car M. Lebaillif a annoncé ce fait qui serait nouveau et important, que le bismuth et l'antimoine exercent *toujours* une force répulsive.

LIVRE QUATRIÈME.

DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE PREMIER.

DES ACTIONS ÉLECTRIQUES.

320. *Il y a des substances qui prennent, par le frottement, la propriété d'attirer les corps légers.* — Il est facile de s'assurer que les diverses substances, prises dans leur état naturel, n'ont aucune-ment la propriété d'attirer les petits fragmens de feuilles d'or ou de clinquant, ni la sciure de bois ou de moelle de sureau, ni les barbes de plume, ni d'autres corps légers, quels qu'ils soient ; mais lorsque, avec une étoffe de laine ou de soie, on frotte no tube de verre, un bâton de soufre ou de résine, un morceau d'ambre ou de succin, ces différens corps prennent à l'instant une propriété très remarquable : ils attirent à eux tous les corps légers qu'on leur présente, et cette attraction est si forte, que les minces feuilles de métal, par exemple, sont enlevées à plus d'un pied de distance, et viennent se précipiter sur la surface du corps attirant. La cause de ce phénomène est ce que l'on appelle l'*électricité*, du mot grec *ἤλεκτρον*, qui signifie *ambre*, parce que la propriété dont il s'agit fut autrefois découverte dans cette substance par les philosophes grecs, dès le temps de Thales, qui vivait 600 ans avant l'ère chrétienne.

Pour distinguer avec plus de certitude les corps qui deviennent électriques par le frottement, on emploie divers appareils que l'on appelle en général *électroscopes*, c'est-à-dire instrumens propres à découvrir l'électricité.

Le plus simple des électroscopes est le *pendule électrique*, qui se compose d'une petite balle de sureau, suspendue à l'extrémité d'un fil de soie, ou d'un fil de métal très fin (Fig. 285). Lorsqu'on veut éprouver un corps, on l'approche de la balle, et s'il ne peut pas l'attirer à lui d'une quantité sensible, on est assuré qu'il n'a point d'électricité, ou plutôt qu'il n'en peut avoir qu'une très faible charge.

L'*aiguille électrique* (Fig. 286) est un autre électroscope un peu plus sensible que le pendule ; elle se compose d'un petit fil de cuivre, terminé par deux boules, *b* et *b'*, qui doivent être creuses pour être plus légères ; au milieu de la longueur du fil

est une chape en acier ou en agate, que l'on pose sur un pivot bien aiguilé. Le frottement de la chape sur le pivot étant la seule résistance à vaincre, on conçoit qu'il est possible de donner à l'aiguille une grande mobilité.

L'*électroscope de Coulomb* (Fig. 300) est l'appareil le plus sensible et le plus délicat, pour indiquer la présence des forces électriques. On le construit avec un fil de soie *f*, une aiguille de gomme laque *g g'*, et un petit cercle de clinquant *e*. Le fil est fixé à l'extrémité supérieure *s*, du tube *r* ; là, on peut l'enrouler ou le dérouler, au moyen du treuil *t* ; on peut aussi lui donner de la torsion au moyen de la pièce mobile *d d'* ; l'aiguille est suspendue par son centre de gravité : sa moitié *g' m*, plus grosse et plus courte, équilibre exactement sa moitié *g m*, chargée du poids léger du clinquant. Une cage en verre *vv'* préserve l'aiguille des agitations de l'air ; elle porte une circonférence divisée *n n'*, et un couvercle *c c'* percé d'une ouverture *0* : c'est par cette ouverture que l'on fait descendre lentement les corps électrisés qui doivent attirer l'extrémité de l'aiguille pour la faire tourner, à moins toutefois qu'ils ne soient assez puissans pour agir du dehors à travers l'épaisseur du verre.

Au moyen de ces appareils, on peut facilement soumettre à l'épreuve tous les corps, et voir s'ils sont tous capables de prendre de l'électricité par le frottement. L'expérience en est curieuse à faire, par l'extrême variété des résultats qu'elle donne : on trouve en effet que la gomme laque et la résine, l'ambre, le soufre et le verre, sont des corps éminemment électriques ; qu'il en est de même du diamant, de la topaze, de l'émeraude et de la plupart des pierres précieuses ; que la terre cuite, le bois et le charbon donnent rarement des signes d'attraction, même quand ils ont été frottés long-temps et à plusieurs reprises ; enfin, que les métaux, et d'autres corps encore, ne prennent jamais la moindre apparence de propriété attractive, quelque soin qu'on apporte à répéter ou à varier les frictions. Voilà donc tous les corps de la nature séparés en

deux grandes classes, ceux qui prennent de l'électricité par le frottement, et qu'on appelle *idéo-électriques*; et ceux qui n'en prennent pas, que l'on appelle *anélectriques*.

330. *Des corps conducteurs et des corps non conducteurs.* — Si les corps anélectriques ne prennent pas d'électricité quand on les frotte, ils peuvent cependant en prendre d'une autre manière. C'est Gray, physicien anglais, qui fit cette découverte en 1727. Gray, après avoir électrisé un tube de verre, ouvert par les deux bouts, voulut voir s'il obtiendrait les mêmes résultats, en fermant le tube avec un bouchon de liège; car à cette époque la science était encore si peu avancée que l'on essayait de tout au hasard, on n'avait rien pour se conduire, pas même un système. Or, en faisant l'expérience, Gray s'aperçut avec un grand étonnement que le bouchon lui-même était devenu électrique, tandis qu'il ne l'est jamais lorsqu'on le frotte directement. Une tige de métal, plantée dans le bouchon, devient électrique comme lui; une tige plus longue le devient pareillement, et l'habile observateur ne se lassait pas de répéter des expériences aussi curieuses. Voyant qu'il ne pouvait pas, dans son cabinet, ajuster au bouchon des tiges assez longues, il imagina de monter au premier étage et de suspendre à son tube électrique un fil de métal qui descendit jusqu'au sol; il frottait le tube, et un de ses amis présentait des corps légers à l'extrémité du fil : ebose surprenant! les corps légers y sont vivement attirés. On répéta l'expérience au second et au troisième étage, et toujours avec le même succès. Donc le métal a la propriété de transmettre l'électricité; et puisqu'il la transmet instantanément, il faut que l'électricité soit une espèce de fluide, qui passe du verre au métal, et qui se répand instantanément sur toute sa surface. Cette propriété se manifeste dans tous les corps anélectriques, et en l'exprime en disant que tous ces corps sont *conducteurs* de l'électricité. Au contraire, les corps idéo-électriques sont *non conducteurs*, c'est-à-dire que l'électricité ne se répand jamais sur leurs surfaces; car en frottant un tube de verre à l'une de ses extrémités seulement, son autre extrémité ne donne aucun signe d'attraction.

Cette vérité fondamentale peut être démontrée avec la *machine électrique*, que nous prendrons seulement comme moyen d'avoir de l'électricité : on fait communiquer avec elle un long fil de métal, soutenu par des fils de soie ou sur des tubes de verre, et dès qu'on tourne la machine, on reconnaît aisément, 1° qu'il est électrisé dans toute son étendue, quelle que soit sa longueur, et quelles que soient les éinconvolutions qu'on lui fasse parcourir; 2° que s'il est interrompu quelque part, par du verre ou de la soie, il ne montre plus d'électricité au-delà de cette interruption; 3° et que s'il touche au sol, il ne donne plus aucun signe électrique; car le sol est assez bon conducteur pour que l'électricité s'y répande, se dissipe au large sur toute sa surface,

et de là se communique à l'édifice entier, en même au globe de la terre.

Il résulte de là, que l'air est un corps non conducteur; car s'il était conducteur, comme un métal, l'électricité développée par le frottement passerait du corps frotté dans l'air qui l'environne, et se disperserait à l'instant dans toute la masse de l'atmosphère.

L'eau et la vapeur d'eau sont de bons conducteurs : un corps électrisé donne toute son électricité à l'eau dans laquelle on le plonge, ou à la vapeur d'eau bouillante à laquelle on l'expose. C'est pourquoi l'électricité, qui se conserve long-temps dans l'air sec, se dissipe promptement dans l'atmosphère, quand l'air est humide.

Le corps humain est aussi un bon conducteur : quand un homme est debout sur un mauvais conducteur, comme un gâteau de résine, il s'électrise dans toute son étendue, en touchant avec sa main des corps électrisés; et quand il repose sur le sol, il ne conserve rien de l'électricité qu'il prend aux corps; il la transmet au sol, où elle va se perdre. Cette propriété nous explique pourquoi les métaux ne s'électrisent point lorsqu'en les tient à la main nue, puisque leur électricité doit se dissiper à mesure qu'elle se développe.

Les plus mauvais conducteurs deviennent d'assez bons conducteurs, lorsqu'on les humecte de quelque vapeur aqueuse; c'est pourquoi il faut chauffer les corps pour les sécher avant de les soumettre au frottement; alors le moindre contact les électrise, et même la main sèche jouit de cette propriété : en passant, par exemple, un tube de verre, un ruban de soie ou une bande de papier entre les doigts, on leur donne une grande force électrique.

La *conductibilité électrique* des différents corps dépend donc d'une cause permanente, qui est la nature de leur substance; mais elle dépend aussi de plusieurs causes accidentelles dont il est difficile de mesurer l'influence. Ainsi, au lieu de dire que les corps sont conducteurs ou non conducteurs, il est plus exact de dire qu'ils sont bons conducteurs ou mauvais conducteurs; car il n'existe pas un corps qui soit non conducteur absolu. Les plus mauvais conducteurs sont la gomme laque, la soie, le verre et les résines; on les appelle aussi corps *isolans*, parce que les corps électrisés qui reposent sur eux sont véritablement isolés ou séparés du sol, et conservent long-temps l'électricité qu'ils possèdent. Les métaux sont les meilleurs conducteurs que l'on connaisse; nous verrons qu'un fil de métal, de plusieurs lieues de longueur, s'électrise à l'instant dans toute son étendue, lorsqu'un peu d'électricité est développée ou déposée sur un seul de ses points. Entre les plus mauvais et les meilleurs conducteurs se trouve l'infinité variée de corps de la nature ayant tous des degrés de conductibilité différents.

331. *Des deux espèces d'électricité.* — Un corps électrisé repousse un corps léger auquel il vient de communiquer de son électricité : en effet, prenons

ou *pendule isolé* (c'est le pendule de la figure 295, dont le support est en verre et dont le fil de suspension est en soie), dès que nous approchons un tube électrisé, la balle de sureau est fortement attirée; mais vient-elle toucher le tube et se coller à lui pendant quelques instans, aussitôt elle est repoussée et repoussée à distance, comme elle était attirée d'abord. Cette répulsion de la balle est produite par l'électricité qu'elle a prise au tube, car en la touchant avec la main pour la remettre à l'état naturel, elle est attirée de nouveau, et de nouveau repoussée dès qu'elle est venue au contact; et ce qui en est une preuve encore plus frappante, c'est qu'alors elle attire les corps naturels, ou plutôt elle est attirée par eux, parce qu'elle est plus mobile. Cette expérience peut être faite avec l'électroscope de Coulomb, ou avec l'aiguille isolée (on appelle ainsi l'aiguille de la figure 296, lorsqu'elle est posée sur une plaque de substance non conductrice, ou bien lorsqu'elle est simplement portée sur son pivot, par un chape isolant; par exemple, un chape de verre ou d'agate). On peut ainsi la varier d'une autre manière, avec une feuille d'or qui flotte dans l'air. Dans tous les cas, chaque corps électrique, quel qu'il soit, repousse toujours le corps léger qu'il vient de toucher.

Mais si l'on prend deux pendules isolés, l'un qui soit électrisé par le verre, et repoussé par lui, l'autre électrisé par la résine, et pareillement repoussé par elle, on observera ce phénomène remarquable : que le verre attire puissamment le pendule qui a été électrisé par la résine, et vice versa, que la résine attire aussi très vivement le pendule qui a été électrisé par le verre; on pourra même observer que les pendules s'attirent l'un l'autre, tandis que deux pendules touchés avec le même corps électrique se repoussent mutuellement (Fig. 297). Donc, l'électricité du verre et celle de la résine ne sont pas identiques, puisque chacune attire ce qui est repoussé par l'autre. Ces deux électricités, différentes dans leur origine et dans leurs effets, doivent porter aussi des noms différens : la première est appelée *électricité vitrée*, et la seconde *électricité résineuse*.

Ainsi nous sommes conduits à cette conséquence importante : qu'il y a deux électricités telles, que chacune se repousse et attire l'autre.

Sans avoir éprouvé les autres corps, nous pouvons être assurés d'avance que leur électricité est résineuse ou vitrée; car s'ils agissent sur un pendule électrisé, il faut bien qu'ils le repoussent ou qu'ils l'attirent. C'est, au reste, ce qu'il est facile de vérifier sur tous les corps. Cette belle découverte des deux électricités a été faite par Du Fay, physicien français, en 1733. (*Mém. de l'Académie des Sciences*, 1733).

Quelques physiciens donnent à l'électricité vitrée le nom d'*électricité positive*, et à l'électricité résineuse celui d'*électricité négative*; il nous arrivera souvent d'employer ces dénominations, bien qu'elles

tiennent à un système où l'on essaie d'expliquer tous les phénomènes par une seule électricité, qui serait tantôt en excès ou en plus, tantôt en défaut ou en moins.

332. *Des fluides électriques et de l'état naturel des corps.* — De la rapidité avec laquelle l'électricité se répand sur toute l'étendue des corps conducteurs, on conclut qu'elle est un fluide excessivement mobile; et, de l'opposition qui existe entre les électricités du verre et de la résine, on conclut que ce fluide est double, c'est-à-dire qu'il y a deux fluides électriques, comme il y a deux fluides magnétiques. Ces deux fluides, combinés entre eux par leur attraction mutuelle, ou neutralisés l'un par l'autre, constituent l'état naturel des corps; mais viennent-ils à être décomposés ou séparés par une cause quelconque, les actions contraires qu'ils exercent au dehors ne peuvent plus se compenser exactement, et le corps dans lequel cette décomposition a eu lieu est un corps électrisé; il est électrisé vitreusement si c'est le fluide vitré qui domine, et résineusement si c'est le fluide résineux. Quant au mode d'existence du fluide électrique dans l'intérieur des corps, tous les phénomènes semblent indiquer qu'il est répandu dans les intervalles qui séparent les atomes, et que là il peut être, du moins en proche, décomposé et recomposé, suivant les forces qui le sollicitent. Il y a toutefois une différence fondamentale entre le fluide électrique et le fluide magnétique : celui-ci est enfermé dans les élémens magnétiques, il peut s'y mouvoir, mais il n'en peut sortir; tandis que le fluide électrique est libre dans tous les corps; il peut traverser dans tous les sens toute l'étendue de leur masse, et même il peut en sortir pour se répandre et s'accumuler sur les corps voisins. Cette vérité résulte évidemment de toutes les expériences que nous avons déjà rapportées, et nous la verrons confirmée par l'ensemble des phénomènes électriques.

Lorsque nous développons de l'électricité résineuse ou vitrée, dans un corps qui était d'abord à l'état naturel, il faut donc que l'électricité contraire se trouve pareillement développée, ou bien qu'elle soit détruite par la cause décomposante. Or, la destruction d'un agent naturel ou d'une force n'étant pas moins impossible que la destruction de la matière elle-même, nous pouvons être assurés que jamais l'une des électricités n'est développée sans l'autre. C'est au reste ce que l'on peut vérifier par l'expérience, en frottant l'un contre l'autre deux disques isolés par des manches de verre (Fig. 298) : lorsque après le frottement ou les tient unis, ils ne donnent aucun signe électrique; mais dès qu'on les sépare, il est facile de reconnaître que l'un possède l'électricité vitrée, et l'autre la résineuse. Ces disques peuvent être en verre, en résine, en bois ou en métal, et si l'on veut donner plus de variété à l'expérience, on y colle des fourreaux, des étoffes, du papier, etc.; car l'espèce d'électricité ne dépend que des surfaces frottantes.

Un corps naturel possédant les deux électricités en égale proportion, il semble d'abord qu'il n'y ait pas de raison pour qu'il prenne ou qu'il conserve l'un des fluides de préférence à l'autre : aussi est-il susceptible de devenir par le frottement, tantôt résineux et tantôt vitré ; par exemple, le verre est vitré quand on le frotte avec la laine ou la soie, et il est résineux quand on le frotte avec une peau de chat, une peau de loutre, et plusieurs autres fourrures. Il y a pareillement des corps qui font prendre à la résine l'électricité vitrée, tandis que beaucoup d'autres lui font prendre la résineuse. Pour définir rigoureusement chacun des fluides, il convient donc d'ajouter que le fluide vitré est produit par le verre frotté avec la laine, et le résineux produit par la résine frottée avec la peau de chat, la laine ou la soie.

Concevons que l'on dresse une liste de tous les corps, en les rangeant par ordre de *tendances électriques*, de telle sorte que chacun soit vitré avec les suivants, et résineux avec les précédents ; alors on pourra reconnaître que des circonstances presque imperceptibles feront changer la place d'un corps dans cette liste : par exemple, une élévation de température le prédisposera à prendre l'électricité résineuse et le fera redescendre de plusieurs rangs, tandis que le refroidissement le fera remonter, en le rendant plus vitré ; une surface plus polie le fera pareillement remonter, tandis qu'une surface plus rugueuse le fera redescendre ; c'est ce qu'il est facile de vérifier sur un tube de verre dépoli. La couleur, la disposition des molécules ou des fibres, le sens de la friction, et même la pression plus ou moins forte du corps frottant, pourront produire des résultats analogues ; par exemple, un ruban de soie noire prend toujours l'électricité résineuse, quand on le frotte avec un ruban blanc, et des rubans de la même pièce étant frottés en croix, celui qui est immobile prend l'électricité vitrée et l'autre la résineuse. Il y a même des substances, comme le *disthène*, qui, sur certaines parties de leur surface, prennent l'électricité vitrée, et la résineuse sur d'autres, sans qu'on puisse y reconnaître la moindre différence de température ou d'aspect. On peut varier indéfiniment ces expériences, avec des rubans de laine ou de soie, des bandes de papier, des pièces de fourrure et des corps conducteurs, que l'on isole très bien en les supportant par des tuyaux de plume.

334. *De la communication de l'électricité.* — L'électricité se communique au contact, et peut aussi se communiquer à distance ; mais dans tous les cas son mode de communication dépend de la conductibilité des corps et de l'étendue de leur surface.

Au contact, les corps très mauvais conducteurs ne prennent ou ne perdent de l'électricité que dans l'étendue de leur contact ; les très bons conducteurs la prennent ou la perdent dans toute l'étendue de leur surface, et les corps intermédiaires,

pour leur conductibilité, présentent des résultats intermédiaires, et prennent ou perdent l'électricité autour des points de contact, dans une étendue d'autant plus grande qu'ils sont meilleurs conducteurs. Ainsi, des balles de verre, de soufre ou de résine, qui touchent des tubes de verre électrisés, des bâtons de résine ou des conducteurs métalliques, ne s'électrisent jamais que dans les points qu'elles ont de commun avec les corps électriques. Des morceaux de papier ou de carton, légèrement humectés, s'électrisent à une certaine distance autour du contact, et les corps métalliques isolés sont, après le contact, électrisés sur toute leur étendue ; par conséquent leur électricité est d'autant moins sensible que leur surface est plus grande. S'ils communiquent au sol, leur surface est infinie, et l'électricité qu'ils prennent, tout-à-fait insensible : en dit alors que l'électricité s'est éconlée dans le sol ou dans le *réservoir commun*, parce que en effet elle s'est répandue sur tout le globe de la terre.

Quand le corps électrisé est lui-même conducteur, il importe peu qu'en le touche par un point ou par un autre : la perte qu'il éprouve se fait sentir sur toute sa surface, et pour le ramener à l'état naturel, il suffit de le mettre un instant en communication avec le sol, tandis que les mauvais conducteurs ne sont déchargés de leur électricité qu'après avoir été touchés dans tous leurs points.

L'électricité qui se communique d *distance* se répand sur les corps à raison de leur conductibilité, comme celle qui se communique au contact ; mais à son passage elle présente le phénomène curieux de *l'étincelle électrique*. Il n'est pas nécessaire qu'un tube soit très fortement électrisé pour qu'on voie, à la distance de plus d'un pouce, briller une vive étincelle quand on en approche une tige de métal ou même la jointure du doigt : en même temps on entend un bruit sec, qui semble jaillir avec l'étincelle ; nous verrons plus tard la cause du bruit et celle de la lumière. Quand le corps électrisé est métallique, et qu'il offre une grande surface, comme les conducteurs de la machine, l'étincelle part à plus d'un pied de distance ; sa lumière prend un éclat éblouissant, et le bruit qui l'accompagne frappe l'air comme un coup de fouet. C'est Otto de Guericke, l'inventeur de la machine pneumatique, qui vit le premier l'étincelle électrique ; et plus tard, Dufay, dont nous venons de parler, excita une grande admiration, en démontrant que du corps d'un homme on peut faire jaillir des étincelles et des lames de feu, comme des conducteurs de la machine. Pour ce faire l'expérience, il faut monter sur un gâteau de résine bien sec, ou sur un isoloir ayant les pieds de verre, et communiquer avec la machine, soit immédiatement en la touchant avec la main, soit immédiatement en la touchant avec une tige ou une éballe de métal ; la personne qui se trouve dans cette position ne reçoit aucun choc lorsqu'en tourne la

machine pour développer de l'électricité, seulement elle éprouve sur la peau, et surtout à la figure, l'impression d'un souffle léger; ses cheveux se hérissent et laissent échapper des aigrettes de lumière; alors si on approche d'elle la jointure du doigt, ou quelque corps conducteur, on en tire de longues étincelles, et l'on éprouve soi-même une commotion électrique qui n'a rien de dangereux. Si l'étincelle ne part qu'à la distance d'un pouce, on ne sent qu'une légère piqûre; si elle part à deux ou trois pouces, la sensation se fait sentir jusqu'au coude, et tout l'avant-bras se fléchit d'un mouvement involontaire et irrésistible; l'étincelle qui part à une distance plus grande, comme à six ou huit pouces, se fait sentir jusqu'à la poitrine, et produit un ébranlement dans tout le corps: alors on est averti qu'il n'est pas prudent de pousser l'expérience plus loin. Pendant ce temps-là la personne isolée, qui communique à la machine, ressent à peu près les mêmes secousses que la personne qui l'approche pour en tirer des étincelles.

De ce qu'on n'est pas brûlé par la lumière électrique, il ne résulte pas que ce soit une lumière sans chaleur: en effet, nous verrons par les expériences suivantes que, dans beaucoup de cas, l'électricité agit comme le feu, et qu'elle devient souvent un agent chimique des plus puissants.

Une bougie qui vient d'être éteinte se rallume à l'instant lorsqu'on tire une étincelle à travers la mèche encore ébaudée.

L'étincelle peut enflammer l'éther et même l'alcool; ces liquides sont dans un petit vase de métal, que l'on approche d'un corps électrisé, de manière que l'étincelle parte à la surface du liquide; le corps électrisé peut être une personne isolée communiquant avec la machine.

Le pistolet de Volta est représenté figure 299; c'est un petit vase en métal qui se ferme par un bouchon de liège; un fil de cuivre terminé par deux petites boules *b*, *b'* passe du dedans au de-

hors sans toucher les parois; pour cela on le mastique avec de la cire dans un tube de verre *tt*; l'étincelle qui entre par ce fil doit passer de la boule *b* à la paroi opposée, en traversant le gaz qui remplit le pistolet. Si ce gaz est détonnant, s'il est par exemple un mélange d'hydrogène et d'air, ou mieux encore d'hydrogène et d'oxygène, dans les proportions qui font l'eau, l'étincelle détermine l'action chimique, la détonation a lieu, le bouchon est lancé au loin et de l'eau est formée.

On doit à M. Wollaston un procédé ingénieux pour décomposer l'eau par l'électricité ordinaire: on fait déposer de l'or dans un tube de verre d'un diamètre très fin, qui est fermé à l'une de ses extrémités; ensuite cette extrémité est usée avec une lime, jusqu'au point de découvrir à la loupe les premières parcelles métalliques; ce tube est recourbé (Fig. 301) et placé dans un vase d'eau communiquant au sol; un fil de métal qui touche l'or intérieur, communique avec une puissante machine; l'électricité est forcée de passer de la machine dans le tube, de sortir de celui-ci par la petite pointe de métal qui a été mise à découvert, pour se répandre ensuite dans l'eau, et de là dans le sol: or, dans ce passage presque infiniment étroit qui lui est laissé, elle exerce contre l'eau une telle action, que l'on aperçoit de petites bulles de gaz s'élever à la file, et les gaz recueillis sont bien de l'hydrogène et de l'oxygène mélangés; ce qui est une preuve certaine de la décomposition de l'eau.

Ces expériences suffisent pour nous donner une idée de la puissance chimique de l'électricité, et, dans la suite des phénomènes curieux que nous avons encore à étudier, nous serons prévenus que les fluides électriques ne traversent pas la masse pondérable des corps sans y exercer des actions moléculaires, et sans développer dans leurs derniers éléments des forces d'agrégation et de ségrégation non moins énergiques que celles que développe la chaleur.

CHAPITRE II.

DE L'ÉLECTRICITÉ PAR INFLUENCE.

335. Un corps électrisé décompose à distance les *électricités naturelles* de tous les corps conducteurs.

— Nous venons de voir que chacun des fluides électriques attire le fluide de nom contraire, et repousse celui de même nom; ces attractions et répulsions n'ont pas lieu seulement sur les fluides libres et déjà décomposés, mais elles s'exercent aussi sur les fluides combinés; et il résulte de

là qu'un corps conducteur peut, *sans rien perdre et sans rien recevoir*, être constitué dans un état électrique particulier, qui naît de la cause agissante à laquelle il est soumis, et qui cesse avec elle. C'est cette électricité produite à distance, que l'on appelle *électricité par influence*.

Par exemple, un anneau de cuivre *nn'* (Fig. 302), portant deux fils de métal très fins et deux balles

de sureau, est soutenu sur un tube ou sur un crochet en verre; on le présente à un corps *a*, électrisé résineusement, et à la distance de plus d'un pied, l'on voit les deux balles qui s'écartent l'une de l'autre pour prendre la position *bb'*. A une distance plus petite la divergence est plus grande, sans que l'étincelle jaillisse entre l'anneau et le corps électrisé. Les balles *bb'* sont donc chargées d'une même électricité, et même il est facile de reconnaître que cette électricité est résineuse, comme celle du corps *a* qui agit sur l'anneau et sur elles. Cependant il n'en faudrait pas conclure qu'il y a une communication électrique au travers de l'air; car, en éloignant l'anneau, soit lentement, soit rapidement, la divergence diminue à mesure que la distance augmente, et elle devient tout-à-fait nulle quand la distance est assez grande; ce qui n'arriverait pas si les balles ou l'anneau avaient reçu du corps *a* une électricité quelconque. Tout le phénomène se passe donc dans les balles et l'anneau, et dans les fils de métal qui les joignent. Ce système de corps conducteurs a ses fluides naturels décomposés par l'influence du corps électrisé; tout le fluide vitré qui résulte de cette décomposition se rassemble dans l'anneau, où il est appelé par l'attraction de *a*, et tout le fluide résineux est repoussé dans les balles par la répulsion. Ainsi, ces deux fluides sont simplement *déplacés*, dans le système conducteur; ils se rejoignent par leur attraction mutuelle, et se recomposent dès que la distance du corps électrisé est trop grande pour les maintenir séparés.

Pour ne laisser aucun doute sur cette vérité fondamentale, il suffit de venir toucher l'anneau avec un petit *plan d'épreuve* (1) que l'on retire à l'instant, et de montrer qu'en effet ce plan d'épreuve est chargé d'électricité vitrée, tandis que les balles divergent par de l'électricité résineuse. On dit quelquefois qu'un corps est dans la *sphère d'activité* ou hors de la sphère d'activité d'un corps électrisé, suivant qu'il en ressent ou n'en ressent pas l'influence; mais il faut remarquer que ces expressions, dont on peut se servir sans inconvénient, sont bien moins relatives au corps électrisé lui-même qu'au corps que l'on soumet à son influence: rigoureusement, la sphère d'activité d'un corps électrisé s'étend à l'infini, et la distance à laquelle nous pouvons rendre ses effets sensibles dépend de la mobilité des appareils que nous employons.

On peut encore disposer l'expérience de la manière suivante: ce (Fig. 303) est un *excitateur* (on l'appelle aussi une tige de cuivre terminée comme le représente la figure; le plus souvent elle peut se tirer et s'allonger comme une lunette); on suspend à chacune de ses extrémités un double

pendule à fil de lin ou de métal, et on le place sur un isolant *a*, alors on approche un corps électrisé *a*, et l'on observe une divergence dans les balles: si le corps est électrisé résineusement, comme le représente la figure, l'électricité vitrée se porte et s'accumule dans la partie de l'excitateur qui en est la plus voisine, et la résineuse est repoussée à l'extrémité opposée; c'est ce qu'on peut vérifier en approchant un tube de verre électrisé ou un bâton de résine, ou en prenant de l'électricité avec le plan d'épreuve pour en reconnaître la nature. Le contraire arriverait si le corps *a* était électrisé vitreusement.

Un corps électrisé par influence agit à son tour, pour électriser les corps voisins qui se trouvent dans sa sphère d'activité, et ces actions successives peuvent se propager jusqu'à de grandes distances. Il suffit de jeter les yeux sur la Fig. 305, pour voir la disposition que l'on peut donner aux appareils dans ces expériences. *a* est un conducteur de la machine, *c* un premier cylindre isolé, *c'* un second cylindre pareil, *s* une bœule de cuivre, et *b* une petite balle de sureau. La divergence des balles indique la présence de l'électricité, et les signes $+$ et $-$ marquent son espèce.

Lorsqu'un corps conducteur est déjà chargé d'électricité, il n'en éprouve pas moins l'influence d'un autre corps électrisé; une seule expérience suffit pour montrer combien de phénomènes curieux peuvent résulter de ce principe. Le petit anneau à pendules, de la première des expériences qui précèdent, est électrisé résineusement; on lui présente un corps électrisé résineusement comme lui, et la divergence des balles augmente. Donc son électricité résineuse est repoussée et refoulée dans les balles, par l'électricité résineuse qui agit sur lui par influence; or, si l'on vent, ses électricités naturelles sont séparées; la résineuse est refoulée dans les balles, où elle s'ajoute à la résineuse qui s'y trouve déjà, tandis que la vitrée est appelée dans l'anneau, où elle neutralise une égale portion de résineuse, en se recomposant avec elle. La charge primitive de l'anneau et celle du corps qu'on lui présente peuvent être telles que, pendant l'action par influence, l'anneau se trouve encore électrisé résineusement, ou qu'il reprenne son état naturel, ou même qu'il se montre avec une charge d'électricité vitrée. C'est ce que l'on peut vérifier avec le plan d'épreuve. Ces phénomènes sont plus apparents, lorsqu'on donne à l'anneau une charge primitive d'électricité vitrée; alors, sous l'influence des corps résineux, qu'on en approche graduellement, les balles se rapprochent peu à peu, reviennent au contact, et divergent de nouveau; ce qui prouve d'une manière évidente que leur électricité vitrée a été peu à peu appelée dans l'anneau, qu'elle y est venue en totalité; et qu'enfin, pour une moindre distance du corps agissant, il s'est fait une décomposition nouvelle qui

(1) Le plan d'épreuve est un petit disque de cliquet ou de papier dans, de quelques lignes de diamètre, qui est collé par son bord ou par son centre à une longue aiguille de graine laque.

refoule du fluide résineux dans les balles, et qui leur donne une nouvelle divergence.

336. *Les corps électrisés par influence retombent à leur état primitif dès que l'influence cesse.* — Puisque la décomposition par influence est instantanée dans les corps conducteurs, la recombinaison doit être instantanée dès qu'on détruit la cause décomposante. Or, on peut en général la détruire de deux manières : soit graduellement, en tirant des corps électrisés de petites étincelles avec un corps isolé, ou en augmentant la distance du corps conducteur qui reçoit son influence; soit subitement, en tirant du corps électrisé une étincelle totale, qui le décharge complètement lorsqu'il est lui-même conducteur. Dans le premier cas, la recombinaison est graduelle comme la diminution de la force, et l'on s'en aperçoit à la divergence des balles, qui diminue de plus en plus; dans le second cas, les deux électricités séparées par influence se rejoignent par leur attraction mutuelle, et se recombosent en totalité, comme on le voit par le rapprochement des balles, qui est subit et complet. Dans ces phénomènes, ni l'un ni l'autre des fluides ne sort de la masse qui reçoit l'influence électrique; mais ils éprouvent tous deux un mouvement de translation dans l'étendue de cette masse, soit quand ils se séparent, soit quand ils se rejoignent; et ces mouvements rapides de l'électricité produisent dans les molécules pondérables des secousses mécaniques ou des effets chimiques très remarquables.

Par exemple, une grenouille, préparée et disposée, comme on le voit dans la figure 304, semble n'éprouver aucun effet lorsqu'on tourne lentement la machine qui charge d'électricité vitrée le conducteur *c*; cependant son électricité naturelle est décomposée par influence, la résineuse est appelée en *a*, tandis que la vitrée est repoussée dans le sol par le fil *s*, et dès qu'on tire une étincelle au conducteur, la recombinaison subite des électricités de la grenouille imprime à tout son corps une sorte de convulsion, qui la fait sauter comme si elle s'élançait par un mouvement volontaire; preuve frappante que, dans le retour à l'état naturel, les molécules des corps sont agitées par les fluides qui se pressent pour se rejoindre. Les commotions de cette espèce s'appellent le choc en retour. L'expérience serait tentée sans succès sur une grenouille tuée depuis cinq ou six heures; mais elle réussit très bien avec une grenouille qui vient d'être coupée et dépouillée, et mieux encore avec une grenouille vivante, telle qu'elle sort de l'eau.

En présence d'une puissante machine, un homme qui communique au sol éprouve des secousses analogues; on en peut faire l'expérience avec un conducteur d'une grande superficie : deux personnes placées aux deux extrémités de ce conducteur, n'éprouvent pas d'effets sensibles pendant qu'il se charge; mais l'une d'elles s'approchant assez près

pour tirer des étincelles, l'autre, à l'instant, éprouve toute la violence du choc en retour, sans qu'il paraisse aucune trace d'électricité ni de lumière, entre elle et le conducteur chargé.

Parmi les malheureuses victimes frappées de la foudre, on en compte un assez grand nombre qui sont mortes subitement, par la seule influence de la queue du nuage; car un nuage orageux est analogue au conducteur de l'expérience précédente; il décompose par influence les électricités naturelles de tous les corps conducteurs qui sont dans sa sphère d'activité; et quand l'éclair jaillit, c'est toujours entre lui et l'un de ces corps : celui-ci est foudroyé directement, par ce qu'on appelle alors la tête du nuage, et les autres sont foudroyés par influence ou par le choc en retour.

Quand le corps conducteur qui reçoit l'influence électrique n'est pas en communication directe avec le sol, il se peut faire qu'il perde peu à peu celle de ses électricités qui est repoussée, et qu'en suite, la cause décomposante étant subitement détruite, il perde tout à coup, par une seule étincelle, l'autre électricité qui s'est accumulée sur sa surface. C'est ce qu'il est facile de vérifier avec un pistolet de Volta convenablement disposé en présence des conducteurs de la machine.

367. *En touchant les corps conducteurs, lorsqu'ils sont soumis à l'influence, on en peut tirer l'une ou l'autre électricité; mais on ne peut les charger que d'une seule électricité, en les mettant en communication avec le sol.* — Reprenons l'un des cylindres isolés de la figure 305, et supposons que ses électricités naturelles soient décomposées par l'influence de la machine; son fluide résineux étant appelé en *a*, son fluide vitré repoussé en *v*, et la ligne neutre *n* n'emarkant sur sa surface les points qui séparent les deux fluides contraires; dans cet état, si l'on vient le toucher avec un plan d'épreuve, on prendra de l'électricité résineuse dans la région *aa*, de la vitrée dans la région *vv*, et l'on ne prendrait point d'électricité sensible sur la ligne neutre *nn*. Mais, si au lieu de toucher le cylindre avec un plan d'épreuve très petit, on vient le mettre en communication avec le sol, on obtiendra des résultats tout-à-fait différents : s'il communique au sol par un point de la région *vv*, tout le fluide vitré s'écoule, et le fluide résineux reste en totalité, maintenu par l'attraction du fluide vitré de la machine; s'il communique au sol par un point de la région *aa*, c'est encore le fluide vitré qui s'écoule, et le fluide résineux qui reste. Phénomène remarquable, très facile à vérifier, et aussi très facile à expliquer; car le fil de métal qui établit la communication avec le sol, éprouve lui-même la décomposition par influence; son fluide vitré est refoulé dans le sol, tandis que son fluide résineux est attiré, passe sur le cylindre, et neutralise, en s'y répandant, tout le vitré qui s'y trouve; le résultat est le même que si le cylindre avait été en communication avec le sol, avant d'éprouver l'influence des conducteurs de la machine.

Or, si en touchant la région *aa*, avec le plan d'épreuve, qui est très petit, on en tire de l'électricité résineuse, et si en la touchant avec le sol qui est très grand, on en tire de la vitrée, il faut bien qu'il existe des corps isolés, d'une certaine dimension, qui n'en pourraient tirer ni l'un ni l'autre des fluides. Cette conséquence est importante, et nous ne la présentons ici que pour indiquer d'avance, 1° que dans la décomposition par influence, le lieu et la forme de la ligne neutre dépendent d'une foule de conditions, et 2° que dans le contact des corps électrisés il se produit des phénomènes très complexes.

308. *Des électroscopes et de leurs usages.* — Nous avons déjà fait connaître le pendule électrique, l'aiguille électrique et l'électroscope de Coulomb; mais on a été conduit par les phénomènes de l'électricité par influence, à construire d'autres électroscopes qui conservent mieux l'électricité qu'on leur donne, et qui sont plus propres à donner approximativement une idée des forces électriques qui les sollicitent. Tous ces appareils se composent essentiellement d'un vase en verre, d'un conducteur fixe et d'un conducteur mobile.

Le vase en verre a la forme d'une cloche ou d'un flacon; l'orifice supérieur est étroit, et le fond peut être de verre (Fig. 308); mais le plus souvent il est en métal (Fig. 306 et 307), et alors il porte deux boules de cuivre (Fig. 306), ou bien il communique à deux petites lames d'étain *ee'* (Fig. 307), qui sont collées verticalement sur les parois intérieures de la cloche.

Le conducteur fixe est une petite lame métallique, qui se termine en haut par une boule (Fig. 306 et 307) ou par un anneau (Fig. 308); elle est masquée avec de la gomme laque dans le col du vase, et même pour plus de précautions l'on vernit la surface extérieure du verre jusqu'à une distance *ee'*.

Le conducteur mobile est suspendu à l'extrémité inférieure du conducteur fixe; c'est de sa nature que dépend le nom de l'électroscope : dans l'électroscope à pailles, il se compose de deux pailles légères, que l'on suspend au conducteur fixe par de petits anneaux de fil de métal très fin (Fig. 308); dans l'électroscope à lames d'or, il se compose de deux lames d'or qui se collent par la simple apposition, sur l'extrémité aplatie du conducteur fixe (Fig. 307); dans l'électroscope à boules de sureau, il se compose de deux fils de métal très fins, qui s'attachent comme les pailles, et qui portent à leur extrémité inférieure de petites boules de sureau *bb'* (Fig. 306). Ces conducteurs mobiles viennent dans leur plus grande divergence, toucher les boules *ee'* ou les lames d'étain *ee'*, pour se décharger de leur électricité; car s'ils allaient toucher la surface du verre, ils y resteraient adhérents et lui communiqueraient une électricité qui pourrait pendant longtemps troubler les résultats.

Les expériences dont nous avons parlé (335 et 336) suffisent pour indiquer l'usage des électros-

copes : lorsqu'on voudra simplement reconnaître la présence de l'électricité dans un corps, il faudra l'approcher graduellement du conducteur fixe de l'électroscope, et observer la divergence toujours croissante des conducteurs mobiles; de deux corps de même forme, placés à la même distance, celui qui produira la moindre divergence aura évidemment la moindre force électrique; mais les intensités ne seront pas proportionnelles aux angles d'écart, elles suivent une loi beaucoup plus compliquée. Lorsqu'on voudra reconnaître l'espèce d'électricité que possède un corps, il faudra préalablement donner à l'électroscope une électricité connue; ce qui se fait de la manière suivante : on approche un corps électrique, et en même temps on touche avec le doigt le bouton de l'électroscope; le fluide repoussé passe dans le sol (367), et en retirant le doigt d'abord, et ensuite le corps électrisé, l'électroscope reste chargé du fluide attiré; c'est-à-dire du fluide contraire à celui du corps qu'on lui présente. Dans cet état, tout corps qu'on en approche, et qui augmente sa divergence, est certainement chargé de la même électricité que l'électroscope; mais l'inverse n'a pas lieu; tout corps qui diminue la divergence, n'est pas certainement chargé d'une électricité contraire à celle de l'électroscope; car les corps conducteurs, pris dans leur état naturel, doivent eux-mêmes produire cet effet sur les conducteurs mobiles, à cause de la décomposition par influence qu'ils éprouvent. Ainsi, l'augmentation de divergence est une épreuve décisive, tandis que la diminution est une épreuve incertaine; à moins toutefois que cette diminution ne soit très grande, et que le corps qui la produit, étant approché davantage, ne soit capable de déterminer une divergence contraire, après avoir ramené jusqu'au contact les conducteurs mobiles de l'électroscope.

Quand l'air est humide, l'électricité se perd promptement, et il serait impossible alors de faire des expériences comparatives avec les électroscopes, si l'on n'avait soin de dessécher l'air qu'ils contiennent, avec quelques fragments de muriate de chaux; et même il est bon de dessécher aussi l'air qui les environne, en les enveloppant d'une cage, au fond de laquelle on place des corps propres à absorber l'humidité.

309. *De l'électrophore.* — Cet instrument, imaginé par Wilek, repose encore sur les principes de l'électricité par influence; il se compose d'un gâteau de résine *a* (Fig. 309), d'un plateau *r* auquel est adapté un manche isolant *m*. La résine est coulée dans un moule en bois ou en métal; il importe que sa surface supérieure soit sensiblement plane, le plateau est en cuivre avec un rebord arrondi, ou simplement en bois revêtu d'étain, son diamètre est moindre d'un ou deux ponce que celui du gâteau. Après avoir électrisé toute la surface de la résine en la battant avec une peau de chat, on pose sur elle le plateau par son manche isolant, et avec

le doigt ou en tire une étincelle; c'est son électricité résineuse qui s'écoule dans le sol; ensuite en relevant le plateau, on le trouve fortement chargé d'électricité vitrée. On peut répéter l'expérience plusieurs centaines de fois de suite sans qu'il soit nécessaire de donner au gâteau une nouvelle charge avec la peau de chat. L'électricité de la résine agissant par influence sur les électricités naturelles du plateau à travers la mince couche d'air qui l'en sépare, y produit une grande décomposition, et l'électricité vitrée qu'elle attire, ne peut pas venir la neutraliser, parce qu'elle ne peut pas s'accumuler sur un point pour vaincre la résistance de l'air. L'électrophore vaut à lui seul une machine électrique.

370. *Expériences diverses.* — Devant le conducteur de la machine est un timbre *t* communiquant au sol, et un pendule isolé (Fig. 310); le conducteur électrisé vitreusement attire d'abord le pendule, le charge d'électricité vitrée, et ensuite le repousse: le timbre, au contraire, étant, par l'influence du conducteur, électrisé résineusement dans sa partie antérieure, attire le pendule quand le conducteur le repousse, le décharge de son électricité vitrée, pour lui en donner de la résineuse, et le repousse vers le conducteur, qui l'attire à son tour. De là les oscillations rapides du pendule, qui se continuent aussi long-temps que l'on tourne la machine pour électriser le conducteur.

Au lieu du timbre on peut prendre une boule de métal, et en lieu du pendule une araignée faite en liège, un peu brûlé à sa surface, et suspendue à un fil de soie; à cause de l'imparfaite conductibi-

lité du liège, les pattes de l'araignée semblent s'attacher pendant quelques instans aux corps électrisés qu'elles touchent (Fig. 311).

Une feuille d'or battu, placée sur un petit plateau de métal communiquant au sol, et à quelques pouces au-dessous du conducteur de la machine, est alternativement attirée et repoussée, et exécute ainsi une série d'oscillations analogues à celles du pendule; c'est de cette manière que l'on fait la danse des pantins, en disposant de petits bonshommes de liège diversement ornés, entre deux plateaux de métal, distans de cinq ou six pouces, dont l'un communique au sol, et l'autre au enducteur de la machine.

Ces expériences, qui ne semblent que des jeux d'enfans, ont suggéré à Volta une ingénieuse idée pour expliquer le phénomène de la grêle. Nous reviendrons sur ce sujet dans la Météorologie; mais nous pouvons dès à présent indiquer l'expérience par laquelle Volta imite les divers mouvemens que les grêlons exécutent entre les nuages, avant de tomber en masse sur la terre. *e* (Fig. 313) est une grande cloche en verre, dont le fond est de métal et communique au sol; le plateau supérieur *p* communique à la machine, et dès que l'électricité *eo* fait sentir, les balles de sureau qui étaient traquées sur le fond, s'élèvent, le touchent, retombent et s'élèvent de nouveau: pendant qu'elles exécutent ces mouvemens alternatifs, elles se beurtent de mille manières, et donnent une idée de cette espèce de cliquetis ou de bruissement que l'on entend dans les nuages quelques instans avant la chute de la grêle.

CHAPITRE III.

DES FORCES ÉLECTRIQUES.

371. *Les attractions et les répulsions électriques sont en raison composée des quantités de fluide, et en raison inverse du carré des distances.* — Cette loi fondamentale des actions électriques a été découverte par Coulomb, comme la loi fondamentale des actions magnétiques, et c'est par des moyens analogues, savoir: par la balance de torsion et par les oscillations d'une petite aiguille, qu'il est parvenu à en démontrer la vérité. La balance électrique diffère peu de la balance magnétique: dans la construction de cette dernière, il faut éviter soigneusement l'emploi des corps ferrugineux; dans la construction de la première, il faut éviter avec le même soin l'emploi des corps conducteurs. On

la construit de la manière suivante: sur une table en bois très sec, on établit par incrustation quatre grandes glaces carrées, de 30 à 40 pouces de côté (Fig. 314); leurs bords verticaux sont travaillés de manière qu'ils se joignent très exactement, et on les colle ensemble, de peur que l'air n'y puisse trouver quelque issue. Une cinquième glace, un peu plus grande, s'ajuste sur les premières pour fermer exactement l'appareil; elle est percée de deux ouvertures circulaires, l'une au centre, sur laquelle s'élève un tube de verre *t*, de 12 à 15 pouces de hauteur et de 2 ou 3 pouces de diamètre, et l'autre sur le côté, par laquelle on introduit les corps électrisés. Au-dessus du tube de verre est un

micromètre pareil à celui de la balance magnétique (Fig. 275); le fil de cuivre ou d'argent qui est fixé au treuil de ce micromètre porte à sa partie inférieure une légère aiguille en gomme laque, très bien équilibrée, et terminée par une petite balle de sureau ou par un disque de clinquant de 6 à 8 lignes de diamètre. Sur le contour de la cage, et vers le milieu de sa hauteur, est une bande de papier qui porte les degrés; le fil de torsion doit toujours, comme nous l'avons vu (327), passer par le centre de ces divisions. Au fond de la balance on met du muriate de chaux dans une capsule, pour absorber l'humidité de l'air.

Pour déterminer, avec cet appareil, la loi des répulsions électriques, on donne d'abord de l'électricité à la balle de l'aiguille suspendue; et ensuite, à l'extrémité d'un tube de verre ou d'un fil de soie, enduit de gomme laque, est une autre balle électrisée de la même manière, que l'on fait descendre dans la balance, avec la précaution de la maintenir à très peu près sur la circonférence que la balle mobile peut décrire dans son mouvement révolutionnaire. La répulsion s'exerce entre ces deux balles comme entre deux pôles magnétiques de même nom, et l'expérience s'achève en effet, comme celle que nous avons rapportée (318). En donnant aux balles des électricités contraires, on détermine aussi la loi des attractions électriques comme celles des attractions magnétiques.

Pour démontrer que les attractions et les répulsions sont en raison composée des quantités d'électricités, il faut s'appuyer sur ce principe évident de lui-même : que deux sphères conductrices et de même rayon, qui sont mises en contact, se partagent également les électricités qu'elles possèdent. Ainsi, après avoir observé la force de torsion qui fait équilibre à l'action attractive ou répulsive des deux balles à une distance connue, si l'on vient toucher l'une d'elles avec une troisième balle isolée, qui lui soit exactement pareille, on lui enlève la moitié de l'électricité qu'elle possède, et l'on reconnaît que, pour la même distance, la force de torsion se trouve réduite à moitié. En prenant une seconde fois, par le même procédé, la moitié du fluide qui reste encore sur l'une ou sur l'autre des balles, on réduirait encore la force à la moitié de sa valeur, et si l'on prenait simultanément la moitié du fluide qui se trouve sur chacune des balles, la force serait réduite au quart de ce qu'elle était.

Coulomb a encore constaté les mêmes lois et avec la même précision, en faisant osciller, devant un globe électrisé, une petite aiguille de gomme laque suspendue à un fil de soie, et portant à l'une de ses extrémités un disque de clinquant, destiné à recevoir l'un ou l'autre fluide. Cet appareil devient tout-à-fait semblable à celui que nous avons décrit (320); seulement, la réaction électrique qui s'exerce alors entre le globe et le disque est la seule cause des oscillations; d'où il résulte que, pour des charges ou pour des distances différentes, les in-

tensités des forces sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations que l'aiguille exécute dans le même temps.

372. *De la perte de l'électricité par l'air et par les supports.* — L'électricité des corps disparaît avec le temps : elle se dissipe dans l'air ou s'écoule dans le sol; c'est un fait qui se constate par toutes les expériences électriques. Ne pouvant empêcher cette déperdition, nous devons nous attacher à la rendre plus lente, plus régulière et plus mesurable; sans cela toute comparaison serait impossible entre les forces, puisqu'à chaque instant elles seraient variables et changeraient irrégulièrement suivant des lois inconnues.

La perte, par les supports isolans, se fait en partie au travers de leur substance, et en partie sur la mince couche d'humidité dont ils sont très souvent revêtus. Cette dernière cause est très influente pour le verre et la soie, qui absorbent la vapeur d'eau avec une grande avidité; c'est pourquoi il est toujours nécessaire d'enduire la surface de ces corps d'une couche de gomme laque, soit en les plongeant dans de la gomme laque fondue, soit en les couvrant d'un vernis de cette substance. Avec cette précaution, les supports de verre et de soie, et ceux de gomme laque pure, isolent à peu près au même degré : il paraît même, d'après les expériences de Coulomb, qu'ils peuvent isoler complètement les faibles charges électriques, lorsqu'ils ont une longueur de 15 ou 20 pouces, et qu'on prend soin de les chauffer avant l'expérience, pour vaporiser l'humidité qui s'y attache. Cependant, puisqu'ils n'isolent complètement que sous la condition d'avoir une grande longueur, il est évident qu'ils s'imprègnent toujours d'une petite quantité d'électricité, et l'on conçoit ainsi qu'une charge plus forte, réagissant sur elle-même avec plus d'énergie, repousse le fluide jusqu'à l'extrémité du support et le force à passer dans le sol, par un écoulement lent mais continu. On reconnaît qu'un corps est parfaitement isolé, lorsqu'en le soutenant par plusieurs supports il éprouve la même perte que s'il était soutenu par un seul, et l'on est alors bien assuré que la perte qu'il éprouve est due au contact de l'air.

La perte par l'air est due en grande partie à la vapeur d'eau qui est toujours plus ou moins abondante dans l'atmosphère, car elle augmente à mesure que l'hygromètre marche à l'humidité : le fait est si frappant que, par exemple, si l'on souffle sur un tube électrisé ou sur un bâton de résine, il ne reste pas de trace de son électricité; il en est de même quand on souffle sur un corps conducteur isolé; mais, dans ce cas, il ne faut pas souffler de trop près, de peur de recevoir la commotion. L'électricité qui s'écoule ainsi par la vapeur d'eau se répand de proche en proche dans l'atmosphère environnante, et il est probable que la transmission ne se fait pas sans que les molécules de vapeur éprouvent une grande agitation. Toute la perte

d'électricité qui se fait dans l'air n'est pas due à la présence de la vapeur : l'air le plus complètement desséché par le muriate de chaux, par l'acide sulfurique ou par les autres corps absorbans, laisse encore échapper, avec le temps, une certaine proportion du fluide électrique des corps qu'il enveloppe. On en peut faire l'expérience dans la balance de Coulomb, après avoir desséché l'air qu'elle contient et après avoir électrisé la balle de l'aiguille et la balle fixe. Supposons, par exemple, que ces deux balles soient maintenues à 20° de distance, par une torsion de 250° du micromètre supérieur; la force qui fait équilibre à la répulsion électrique est alors de $250 + 20 = 270^\circ$; avec le temps on verra les deux balles se rapprocher, et après 1' il faudra détordre le micromètre supérieur de 6°, par exemple, pour la remettre à la distance primitive de 20°. Ainsi, en 1', la force électrique perdue sera celle qui fait équilibre à 6° de torsion; et si l'on veut avoir son rapport à la force électrique moyenne qui a eu lieu pendant cette minute, il suffira de remarquer qu'au commencement cette force était 270°; qu'à la fin elle était $244 + 20 = 264$, dont la moyenne est $\frac{270 + 264}{2} = 267$; d'où il résulte enfin que la perte a été, pendant une minute, $\frac{6}{267} = \frac{1}{44,5}$; c'est-à-dire un quarante-quatrième à peu près de la force moyenne.

C'est de cette manière que Coulomb est parvenu à évaluer exactement la perte par l'air : dans les jours secs, on trouve souvent qu'elle n'est par minute que $\frac{1}{80}$ ou même $\frac{1}{70}$ de la force moyenne; mais dans les temps un peu humides elle est quelquefois de $\frac{1}{20}$: alors il est à peu près impossible de faire des expériences exactes. Lorsqu'il y a peu de variations atmosphériques soit dans la chaleur, soit dans la direction du vent, la perte par l'air reste sensiblement la même, dans le cours d'une journée, et l'on peut facilement comparer la perte qui a lieu dans la balance à celle qui a lieu au dehors sur un corps conducteur électrisé : pour cela on vient toucher ce corps avec une balle isolée ou avec un plan d'épreuve que l'on reporte à l'instant dans la balance; ou le met en contact avec la balle de l'aiguille, et l'on observe la répulsion; puis, après quelques minutes, on répète la même expérience, en ayant soin toutefois de remettre à l'état naturel le plan d'épreuve et la balle mobile, et alors on observe une répulsion moindre; ce qui est une marque certaine qu'un second contact le corps avait moins d'électricité, puisqu'il en a moins donné au plan d'épreuve. Or, en admettant, comme nous le verrons plus loin, qu'un corps donne au plan d'épreuve qui le touche, au même endroit et de la même manière, des quantités d'électricité proportionnelles à celles qu'il possède, on voit que les charges électriques du corps, aux deux époques du contact, seront proportionnelles aux forces de torsion, et qu'ainsi il sera facile de déterminer la perte qu'il a éprouvée dans l'intervalle.

Ces moyens de comparer les forces électriques, et de calculer ce qu'elles doivent être à chaque instant, lorsqu'on sait ce qu'elles sont à une époque donnée, est une des plus belles inventions qui aient été faites en électricité; c'est par là seulement que Coulomb a pu peser, et qu'il a en effet posé, les principes fondamentaux de la science.

373. *Distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs.* — L'électricité naturelle est uniformément répandue dans toute la masse d'un corps conducteur, et elle y paraît accumulée en quantité indéfinie comme la chaleur et le magnétisme; mais dès qu'un fluide est libre ou séparé de l'autre, il réagit sur lui-même par sa force répulsive, et toutes ses molécules tendent sans cesse à se disperser, jusqu'à ce qu'elles trouvent un obstacle qui les arrête. Un corps qui serait parfaitement conducteur n'offrirait dans toute sa masse aucune résistance à cette dispersion; le fluide, parvenu rapidement à sa surface, en sortirait pour se répandre plus loin, s'il y rencontrait encore un espace également perméable. Le vide laissant passer l'électricité, un corps électrisé qui serait placé au milieu du vide perdrait à l'instant tout son fluide libre; ainsi la terre est probablement, parmi les planètes, la seule qui puisse être électrisée à sa surface, puisqu'elle est la seule qui paraisse avoir une atmosphère autour d'elle. Nous verrons que les métaux eux-mêmes n'ont pas une conductibilité parfaite; cependant le fluide électrique passe avec une telle rapidité, d'un point à un autre de leur masse, que nous pouvons, du moins pour le moment, supposer que l'électricité dont ils sont chargés n'a aucune résistance à vaincre pour se mouvoir dans leur substance. Il résulte de cette hypothèse que l'électricité libre, développée en un point quelconque d'un conducteur métallique, vient toujours à sa surface où elle se trouve arrêtée par l'air environnant. Mais comment s'arrange-t-elle dans la masse entière du conducteur? Faut-il, pour l'équilibre, qu'elle s'y répande uniformément, comme l'air se répand dans un ballon? ou bien faut-il que ses molécules, obéissant à leur force répulsive, viennent s'accumuler et se presser contre l'air qui enveloppe sa surface, ou contre les corps non conducteurs qui la couvrent? Voici trois expériences qui peuvent jeter quelque lumière sur ce point fondamental de la théorie : 1°. Un globe isolé (Fig. 315) est recouvert de deux hémisphères en papier métallique ou en clinquant, que l'on peut à volonté mettre ou enlever, au moyen de deux manches de verre v et v' : on l'électrise dans cet état; ensuite on enlève rapidement les hémisphères, et le globe ainsi dépouillé de son enveloppe est aussi dépouillé complètement de son électricité. Donc le fluide se porte à la surface, et s'y accumule de telle sorte qu'il n'en reste pas à l'intérieur.

2°. Une sphère de 7 ou 8 pouces de diamètre, ayant une petite cavité de 8 ou 10 lignes de lar-

geur et de 1 pouce de profondeur, est isolée et chargée d'électricité; lorsqu'on vient avec le plan d'épreuve la toucher à sa surface, on y prend du fluide; mais lorsqu'on la touche au fond de la cavité, le plan d'épreuve reste sensiblement à l'état naturel.

3°. Enfin, deux sphères conductrices de même rayon sont électrisées ensemble, et ensuite séparées; on vient toucher l'une d'elles avec une sphère pleine en métal, et l'autre avec une sphère de même rayon que la précédente, mais faite avec du clinquant ou du papier doré, ou simplement en collant des feuilles d'étain ou d'or battu sur un globe de résine; après le contact on essaie, avec le plan d'épreuve et la balance, les forces électriques des deux premières sphères, et on les trouve exactement pareilles: donc la sphère pleine en métal n'a pas plus enlevé d'électricité à la première que la sphère superficielle n'en a enlevé à la seconde; ce qui est une preuve évidente que l'électricité libre ne réside jamais dans l'intérieur des corps, qu'elle est toujours à la surface, et même qu'elle n'y occupe qu'une épaisseur insensible; car si la couche de fluide électrique devait être plus épaisse qu'une feuille d'or battu, la sphère superficielle n'en prendrait pas autant que la sphère pleine.

Ces preuves expérimentales sont encore confirmées par une preuve mathématique: car cet arrangement de fluide électrique dans son état d'équilibre est une conséquence rigoureuse de la répulsion, qui agit sur ses molécules en raison inverse du carré de la distance.

De ce que le fluide électrique, repoussé par lui-même, forme à la surface des corps une épaisseur moindre qu'une feuille d'or battu, il n'en faudrait pas conclure que cette épaisseur est insensible, et qu'elle n'entre pour rien dans les phénomènes. Les dimensions qui échappent à la prise directe de nos sens n'en sont pas moins comparables entre elles; et les épaisseurs infiniment petites des couches électriques peuvent être décuplées ou centuplées l'une de l'autre, comme les épaisseurs qui se comptent par toises ou par mètres. Sur un globe conducteur électrisé (Fig. 316), tout étant symétrique autour du centre, il est évident que la couche électrique doit avoir partout la même épaisseur; ainsi elle est comprise entre la surface e et du globe, où elle s'arrête contre l'air, et une autre surface s r , pareillement sphérique, qui passe au-dessous ou au dedans de la première, d'une quantité infiniment petite; cette surface intérieure de la couche électrique est sa surface libre; il semble d'abord qu'une molécule de fluide, telle que m , ne puisse être en équilibre dans cet état; mais en couvrant le plan p m p' , on verra que, si tout le fluide qui est au-dessus tend, par sa répulsion, à précipiter la molécule m vers le centre, tout le fluide qui est au-dessous tend, au contraire, à la repousser vers la surface; et l'on démontre mathématiquement que, par la loi de la raison inverse du carré de la distance, ces deux forces

opposées doivent exactement se faire équilibre. Il n'en est pas de même d'une molécule n de la surface extérieure; celle-ci est repoussée loin du centre par toutes les molécules du fluide; de là l'effort continué qu'elle exerce contre l'air ou contre les corps non conducteurs sur lesquels elle s'appuie.

M. De Laplace a démontré que le fluide électrique a une force répulsive qui est partout proportionnelle à son épaisseur; et comme la pression qu'il exerce contre l'air ou contre les obstacles qui l'arrêtent est en raison composée de sa force répulsive et de son épaisseur, il en résulte que cette pression, en chaque point, ou sur chaque élément de surface; est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche qui se trouve en ce point ou sur cet élément. Ainsi, le fluide électrique répandu sur les corps conducteurs, peut être considéré comme les fluides pondérables contenus dans des vases contre lesquels ils exercent des pressions: quand ces vases sont assez résistants, le fluide est contenu; quand ils sont trop faibles pour résister à la pression, les parois crévent et le fluide s'écoule: pour le fluide électrique, le vase est le corps conducteur, la paroi est l'air qui l'enveloppe, ou la couche de vernis non conducteur qui le couvre; et quand l'épaisseur de l'électricité est assez grande, elle fend l'air ou elle perce la couche de vernis, et l'étincelle jaillit, ce qui est la marque d'un écoulement rapide du fluide. Quand la couche électrique est arrêtée et maintenue en équilibre, il est évident que la somme des actions qu'elle exerce sur un point intérieur quelconque, tel que n , est toujours nulle; sans cela elle opérerait par influence une nouvelle décomposition des fluides naturels qui sont en ce point, et l'équilibre serait troublé.

Sur un ellipsoïde de révolution (Fig. 319), l'épaisseur électrique n'est plus la même aux différents points de la surface: il résulte des conditions mathématiques dont nous venons de parler, qu'au pôle p et en un point q de l'équateur les épaisseurs sont entre elles comme les rayons ep et eq , par conséquent les pressions sont entre elles comme les carrés de ep et eq . Par exemple, si l'ellipsoïde est très allongé; de telle sorte que $ep=100eq$, la pression au point p sera 10,000 fois plus grande qu'au point q ; c'est donc toujours par l'extrémité la plus amincie de l'ellipsoïde que le fluide devra s'écouler.

Une pointe très aiguë peut toujours être considérée comme étant le pôle d'un ellipsoïde de révolution très allongé; ainsi, quelque faible que soit la charge électrique d'un tel corps, le fluide qui s'accumule à son sommet y formera toujours une épaisseur assez grande pour vaincre la résistance de l'air: de là le pouvoir des pointes, qui avait été découvert par Franklin avant qu'il fût expliqué par la théorie. On dit quelquefois que les pointes ont le pouvoir d'attirer le fluide élec-

trique; c'est précisément le contraire qu'il faut dire : elles ont la propriété de laisser écouler le fluide dont elles sont chargées. On peut faire une foule d'expériences sur cette propriété; nous indiquerons les suivantes.

1°. Une pointe aiguë étant placée sur les conducteurs de la machine, il devient impossible de leur donner de l'électricité et d'en tirer des étincelles; le fluide se dissipe par la pointe à mesure qu'il se développe par le mouvement de la machine.

2°. Une pointe communiquant au sol, étant présentée aux conducteurs de la machine à un pied de distance, il devient pareillement impossible de les charger. L'électricité du conducteur décompose par influence les électricités de la pointe; elle repousse dans le sol celle de même nom et attire celle de nom contraire, qui s'accumule à la pointe et qui s'échappe à travers l'air pour venir neutraliser celle du conducteur.

3°. Un *tindre à pointe* (Fig. 312) étant sous les conducteurs de la machine, à deux ou même à trois pieds de distance, le bruit des petits pendules *p* et *p'* annonce l'écoulement de l'électricité. Cette expérience est la même que la précédente; les lignes noires représentent sur la figure les fils qui doivent être non conducteurs.

Nous devons revenir sur les propriétés des pointes, lorsque nous parlerons de la lumière électrique, et surtout lorsque, dans la Météorologie, nous aurons à étudier l'électricité atmosphérique et la construction des paratonnerres.

Les angles et les arêtes des corps conducteurs présentent des phénomènes analogues à ceux des pointes; c'est pourquoi il faut éviter soigneusement toutes les formes anguleuses dans les appareils qui sont destinés à conserver l'électricité.

Les résultats précédents nous conduisent à une question générale, dont nous pouvons maintenant comprendre le sens et l'étendue : des corps conducteurs sont donnés, on connaît leurs formes et leurs grandeurs; les uns sont à l'état naturel, les autres ont des charges connues d'électricité résineuse ou vitrée; on les met en présence pour former un système connu de position; on suppose que les fluides réagissent simplement sans passer d'un corps à l'autre, et l'on demande quel est l'état électrique d'un point quelconque de ce système; c'est-à-dire, quelle espèce d'électricité s'y trouve, et quelle épaisseur elle y forme.

Coulomb a donné un moyen expérimental de résoudre ce problème dans toute son étendue. Voici le principe sur lequel il repose : quand un plan d'épreuve très mince et assez petit, est posé tangemment sur une surface électrisée, et retiré perpendiculairement sans la toucher par ses bords, il est chargé sur chaque face d'une épaisseur électrique qui est la moitié de celle que possédait la surface au point de contact. Coulomb a démontré ce principe en déterminant le rapport suivant le-

quel l'électricité se partage entre une sphère et un plan circulaire qui vient la toucher par son centre, et qui est retiré perpendiculairement. Mais on peut encore s'en rendre compte d'une autre manière : quand le plan d'épreuve est tangent à une surface, il se confond avec l'élément qu'il touche, il prend en quelque sorte sa place, relativement à l'électricité, ou plutôt il devient lui-même l'élément sur lequel le fluide se répand; ainsi, quand on retire ce plan, on fait la même chose que si l'on avait découpé sur la surface un élément de même épaisseur et de même étendue que lui, et qu'on l'eût enlevé pour le porter dans la balance sans qu'il perdît rien de l'électricité qui le couvre; une fois séparé de la surface, cet élément n'aurait plus dans ses différents points qu'une épaisseur électrique moitié moindre, puisque le fluide devrait se répandre pour en couvrir les deux faces. Ce principe posé, l'expérience n'exige plus que de l'habitude et de la dextérité : après avoir touché un point de la surface avec le plan d'épreuve, on l'apporte dans la balance, où il partage son électricité avec le disque de l'aiguille qui lui est égal, et l'on observe la force de torsion à une distance connue. On répète la même expérience, en touchant un autre point, et le rapport des forces de torsion est le rapport des répulsions électriques; on en prend la racine carrée pour avoir le rapport des épaisseurs. Ainsi, le génie de Coulomb a donné en même temps aux mathématiciens la loi fondamentale suivant laquelle la matière électrique s'attire et se repousse; et aux physiciens une balance nouvelle et des principes d'expérience, au moyen desquels ils peuvent en quelque sorte sonder l'épaisseur de l'électricité sur tous les corps, et déterminer les pressions qu'elle exerce sur les obstacles qui l'arrêtent.

Le problème général dont nous venons de parler, et qui peut être dans tous les cas si facilement et si complètement résolu par l'expérience, peut être attaqué aussi par l'analyse mathématique. M. Poisson a publié deux Mémoires sur ce sujet (*Mém. de l'Institut*, 1811, 1^{re} et 2^e parties); en s'appuyant sur la loi de Coulomb, et sur quelques théorèmes fondamentaux de l'attraction des sphéroïdes déformés par M. De Laplace, il parvient à des équations générales, qu'il résout ensuite, pour le cas d'un ellipsoïde ou de deux sphères, au moyen de ces savans artifices de calcul qui lui sont si familiers.

Dans l'impossibilité où nous sommes de faire connaître ce travail, même par extrait, nous nous contenterons de citer quelques-uns des résultats les plus remarquables; ils sont d'autant plus décisifs pour prouver l'exactitude de l'analyse, que Coulomb les avait démontrés par l'expérience (*Mém. de l'Académie*, 1787).

1°. Quel que soit le rapport des rayons de deux sphères électrisées, quand elles se touchent, l'épaisseur électrique est nulle au point de contact.

3°. A partir du point de contact l'épaisseur électrique croît lentement; dès qu'elle devient sensible, elle est plus grande sur la sphère du plus grand rayon; mais ensuite, à une certaine distance, elle commence à croître plus rapidement sur la plus petite sphère, de telle sorte qu'elle y est toujours plus grande à une demi-circonférence de distance du point de contact.

3°. En ces points, diamétralement opposés au point de contact, le rapport des épaisseurs est d'autant plus grand que la petite sphère est plus petite; mais il tend vers une limite qui est 4,2.

4°. Quand on sépare ces sphères, et qu'on les soustrait à leur action mutuelle, l'épaisseur électrique est toujours plus grande sur la plus petite; le rapport de ces épaisseurs tend pareillement vers une limite, qui est 5/3.

5°. Quand on écarte seulement ces sphères à des distances diverses, de manière qu'elles restent soumises à leur influence mutuelle, leur électricité commune étant, par exemple, la vitrée, la petite sphère prend l'électricité résineuse au point le plus voisin de la grande sphère, et à une certaine distance autour de ce point; elle continue d'être électrisée résineusement dans cette partie, à mesure qu'on l'éloigne, mais de moins en moins; quand l'intervalle qui sépare les sphères est (dans les circonstances les plus favorables) égal à peu près au demi-rayon de la plus grande, l'électricité résineuse disparaît; et au delà, la petite sphère devient vitrée sur toute sa surface, comme la plus grande. Quand le rayon de la petite sphère surpasse la sixième du rayon de la grande, l'électricité résineuse paraît encore; mais elle disparaît avant que l'intervalle des sphères soit égal au demi-rayon de la plus grande.

6°. Quand une petite sphère, prise à l'état naturel, est électrisée par l'influence d'une sphère plus grande, elle réagit sur celle-ci pour troubler l'épaisseur uniforme de sa couche électrique, et alors cette épaisseur va en décroissant depuis le point le plus voisin de la petite sphère jusqu'à une distance de 3/4 de circonférence; au delà elle redevient croissante jusqu'au point diamétralement opposé.

374. *Des machines électriques.* — Les machines électriques se composent d'un corps frottant, d'un corps frotté et d'un conducteur isolé.

Le corps frotté est quelquefois un grand cylindre en verre, mais le plus souvent il n'est qu'une glace circulaire r, r' (Fig. 317 et 320), qui peut avoir jusqu'à six pieds de diamètre: c'est ce qu'on appelle le plateau de la machine: il est porté sur un axe xx' , que l'on met en mouvement au moyen de la manivelle m .

Le corps frottant se compose ordinairement de deux paires de coussins élastiques r, r' (Fig. 317, 318 et 320); ils sont rembourrés de crin; la face qui touche le plateau est en cuir, et la face opposée est une bande de bois ou de métal; chaque paire de coussins presse le plateau; on ajoute quelque-

fois un ressort r et une vis v pour varier à volonté la pression (Fig. 318).

Le conducteur de la machine est en laiton, sa forme se rapproche le plus possible du cylindre et de la sphère; on l'isole par de longues colonnes en verre, vernies à la gomme laque L, L, L .

Avant de mettre la machine en activité, on sèche avec des réchauds les colonnes et le plateau, on ôte les coussins, pour les frotter l'un contre l'autre, après avoir mis entre eux du deuto-sulfure d'étain, que l'on appelle *or musif*. Les coussins remis en place et convenablement pressés, on ajuste les garnitures ou les armatures en taffetas r, r' , qui couvrent de chaque côté deux quarts opposés du plateau, et l'on tourne la manivelle dans le sens de ces armatures. La machine ordinaire (Fig. 317) ne donne que de l'électricité vitrée; la machine de Van-Marum (Fig. 319 et 320) donne à volonté l'électricité résineuse ou la vitrée.

Lorsqu'on veut avoir l'électricité vitrée, on tourne l'arc aa' verticalement, de manière que les cylindres cc' qui sont à deux ou trois lignes du plateau, aboutissent près de l'extrémité des garnitures en taffetas, et l'arc aa' horizontalement, de manière que les cylindres cc' touchent les coussins. Alors la machine étant mise en mouvement, le plateau s'électrise vitreusement; son électricité, maintenue par les taffetas, ne se dissipe pas dans l'air; elle vient en présence des cylindres c, c' , se décompose par influence leurs électricités naturelles, repousse la vitrée dans l'arc aa' et dans le globe g , tandis qu'elle attire la résineuse qui s'échappe en étincelle, et qui vient la neutraliser: c'est ainsi que les conducteurs s'électrisent vitreusement. En même temps, l'électricité résineuse des coussins se répand dans les globes gg' , dans l'arc oa, o' , et de là dans le sol, par la chaîne aa' .

Lorsqu'on veut recueillir l'électricité résineuse, on dispose l'arc aa' horizontalement, de manière qu'il touche les coussins, dont il reçoit l'électricité résineuse, et l'on relève verticalement l'arc ao' qui communique toujours au sol, pour qu'il puisse décharger sans cesse le plateau et le remettre à l'état naturel; cette position des conducteurs mobiles est représentée dans les figures 318 et 320, par des lignes ponctuées.

Dans tous les cas, il y a une limite à la tension électrique que peuvent prendre les conducteurs; en effet, le plateau se charge, en passant sur les coussins, d'une épaisseur finie d'électricité vitrée. Cette électricité agit toujours par influence pour décomposer les électricités des conducteurs, et elle les décompose aisément quand ils sont à l'état naturel; mais quand ils sont eux-mêmes chargés d'électricité vitrée, la décomposition devient de plus en plus difficile, et l'on conçoit qu'il y a une limite où elle devient tout-à-fait impossible; alors le plateau ne peut plus produire aucune accumulation nouvelle, fût-il même animé d'une vitesse infinie

de rotation. Les conducteurs pourraient, avec le temps, arriver à cette limite, s'ils n'éprouvaient aucune déperdition par l'air et par les supports; mais la perte qu'ils éprouvent devant se compenser à chaque instant, il faut que leur charge soit moindre afin que le plateau puisse encore décomposer leur électricité naturelle; et alors plus la rotation est rapide, plus ils reçoivent d'électricité dans le même temps : ainsi la limite de tension électrique que les conducteurs peuvent recevoir dépend de leur étendue, des qualités électriques du plateau et de sa vitesse de rotation.

Lorsqu'on veut tirer des étincelles à de grandes distances, on fait communiquer aux conducteurs des machines, des *conducteurs secondaires* qui se chargent comme les premiers. Toute l'électricité qui couvre le système se déchargeant d'un seul coup, il est facile, en donnant aux surfaces une étendue convenable, de produire des lames de feu de plusieurs pieds d'étendue; mais il faut que la machine soit assez puissante pour compenser à chaque instant les pertes que font de si grandes surfaces, soit par le contact de l'air, soit par les supports.

CHAPITRE IV.

DE L'ÉLECTRICITÉ DISSIMULÉE.

375. *De la dissimulation de l'électricité, et de sa recombinaison lente ou subite.* — Concevons deux disques conducteurs c et c' (Fig. 321) mis en présence et séparés par une lame non conductrice xx' en verre ou en résine; quand le disque c reçoit par exemple de l'électricité vitrée, et le disque c' de la résineuse, ces deux électricités s'attirent au travers de la lame non conductrice xx' , et en pressent les deux faces opposées par l'effort qu'elles font pour se rejoindre; on dit alors que ces électricités sont *dissimulées*; et, en effet, quand les disques sont chargés, on peut les toucher l'un ou l'autre sans que leur fluide s'écoule dans le sol, mais il faut les toucher *séparément* et non pas *simultanément*; le fluide de celui qui est touché n'obéit pas à la force répulsive qui lui est propre, parce qu'il est attiré et retenu par le fluide de l'autre. Ainsi les plus fortes charges électriques s'accumulent sur les disques, se pressent sur les faces opposées de la lame non conductrice, et restent dissimulées l'une par l'autre tant que l'on n'effle d'issue dans le sol qu'à l'un des deux fluides. Supposons que les deux disques soient mathématiquement de même forme et de même grandeur; que la lame xx' soit bien plane sur ses deux faces, et partout également épaisse, et que la machine en la source quelconque qui donne de l'électricité vitrée au disque c , par le moyen du fil f , soit exactement de même force que celle qui donne de l'électricité résineuse au disque c' , par le fil f' , de telle sorte que tout soit symétrique de part et d'autre du plan pp' qui passe au milieu de l'épaisseur de xx' . Alors il est évident que les deux disques auront toujours des charges égales, et que dans les points symétriquement placés sur chacun d'eux les épaisseurs en les tensions électriques seront aussi toujours les mêmes. Cela posé, voici un principe fon-

damental de l'électricité dissimulée : c'est qu'après avoir donné à l'appareil une charge quelconque, et l'avoir isolé ensuite en supprimant la communication des fils ff sans les laisser toucher au sol, il arrive toujours que la *dissimulation est incomplète*, c'est-à-dire qu'il n'existe aucun point sur les disques ni sur les fils où la tension électrique soit tout-à-fait nulle. Cette tension est très grande sur les faces intérieures s et s' ; et là, quand les surfaces ont assez d'étendue, les fluides peuvent presser la lame xx' avec tant de force qu'ils s'ouvrent un passage au travers de sa substance et la percent pour se rejoindre; si cette lame est de résine ou de soufre, il se fait alors une multitude de petites fissures imperceptibles; mais si elle est de verre mince, les fluides ne font qu'un seul trou, par lequel ils se précipitent avec éclat pour se recombinaison. Sur les faces extérieures e , e' , et sur les fils ff , la tension électrique qui s'exerce contre l'air est très faible en comparaison de la tension intérieure : mais elle existe, comme on peut s'en assurer avec le plan d'épreuve, ou même en présentant la jointure du doigt successivement à chaque disque ou à chaque fil, car on en tire de petites étincelles. La dissimulation ne peut pas être complète, parce que les fluides accumulés pour la plus grande partie sur les faces intérieures s et s' , restent encore séparés par l'épaisseur de la lame non conductrice xx' ; et que c'est un contact seulement qu'ils peuvent être neutralisés en totalité l'un par l'autre. Ainsi la dissimulation est d'autant plus parfaite que la lame non conductrice est plus mince; mais en même temps, plus la lame est mince, et moins elle offre de résistance à la pression électrique. C'est là, comme nous le verrons tout à l'heure, ce qui limite le degré d'accumulation que nous pouvons donner à l'électricité.

L'appareil était chargé comme nous venons de le dire, les électricités dissimulées peuvent se recomposer subitement ou lentement.

La *recomposition subite* se détermine de la manière suivante : on prend par ses manches isolants m m' l'excitateur bcb' (Fig. 322), donc les deux arcs en cuivre bc , $c'b'$ sont mobiles autour de la charnière c , ne touche l'un des disques avec la boule b , et on approche de l'autre disque la boule b' , à un ou deux pouces de distance, l'étincelle jaillit avec beaucoup d'éclat et de bruit, et l'appareil est déchargé. Par la tension électrique qui est au point de contact b , une partie du fluide vitré se répand sur tout l'excitateur; alors le fluide résineux est moins attiré qu'il n'était, son épaisseur diminue sur la face a et augmente sur la face extérieure a' , d'où il attire le fluide vitré qui est en b ; cette attraction fait effiner le fluide vitré vers b' , il s'accumule en cet endroit, il diminue sur le disque c , et en même temps le fluide résineux, devenu plus libre, se porte et s'accumule vers la face extérieure de c où il est maintenant attiré; enfin la tension est assez forte pour s'ouvrir un passage dans l'air, et tout le fluide se précipite et se recompose à l'instant.

La *recomposition lente* offre des phénomènes curieux, et montre mieux encore le jeu des électricités dissimulées. Les disques étant électrisés et isolés (Fig. 323), deux petites pendules pp' communiquant avec leurs faces extérieures éprouvent une répulsion produite par l'électricité qui est libre sur ces faces; en touchant le disque c , par exemple, on en tire une petite étincelle, le pendule p retombe et le pendule p' se relève à l'instant comme si le disque c eût pris une charge nouvelle; mais cet accroissement de répulsion résulte seulement du fluide résineux qui est devenu libre par la perte de vitré qu'éprouvé le disque c ; on touche ensuite la boule c' , son pendule retombe, et celui de c se relève; on retourne au disque c : le même phénomène se reproduit, ainsi de suite alternativement, jusqu'à ce que l'appareil soit complètement déchargé.

Nous avons supposé que les disques recevaient de l'électricité, l'un d'une source résineuse et l'autre d'une source vitrée, et que chacun d'eux en recevait des quantités égales; mais le plus souvent on n'emploie qu'une seule machine; le disque c , par exemple, est mis en communication avec elle, et le disque c' en communication avec le sol; alors celui-ci se charge par influence, et la charge qu'il prend est toujours moindre que la charge de c . Quand les communications sont rompues, le pendule p' est au repos et le pendule p diverge; mais la perte par l'air se trouvant proportionnellement plus grande sur le disque c , on voit son pendule s'abaisser peu à peu, tandis que le pendule p' se relève, et l'égalité de divergence une fois établie, la perte par l'air devient égale; les deux pendules retombent ensemble, d'autant plus lentement que l'air

est plus sec. Au lieu de deux disques séparés par une lame de verre, on peut employer, pour les expériences précédentes, un simple carreau de verre, sur les faces duquel on colle des feuilles d'étain, en laissant à découvert sur les bords un espace de deux ou trois pouces que l'on vernit pour augmenter son inconductibilité (Fig. 324).

376. *Des condensateurs*.—Tous les appareils dans lesquels on accumule de l'électricité dissimulée se composent essentiellement de deux lames conductrices, séparées par une lame non conductrice, et on les nomme en général des *condensateurs*, parce qu'en effet le fluide électrique paraît se condenser en se dissimulant. Ces appareils changent de forme et de nom suivant les usages auxquels on les destine.

Ceux qui nous ont servi aux expériences précédentes (Fig. 321, 322, 323 et 324) sont des *condensateurs à lames de verre*; ils sont capables d'accumuler de grandes quantités d'électricité, mais à cause de l'épaisseur du verre ils ne peuvent être chargés que par des machines, par des électrophores, ou en général par des sources électriques d'une grande tension.

Le *condensateur à taffetas* (Fig. 326) est composé d'un disque en bois aa' , revêtu d'un taffetas vernissé tt' , et d'un plateau conducteur e e' à manche isolant m ; le plateau étant mis en communication avec une source électrique, soit directement, soit au moyen de la tige à boule gb , le fluide se répand sur toute sa surface, agit par influence, au travers du taffetas, sur les électricités naturelles du disque en bois qui doit communiquer au sol, et l'appareil se charge en raison de la tension de la source qui lui fournit du fluide. Ensuite on soulève le plateau perpendiculairement pour le séparer du taffetas, et pour reconnaître, par l'électroscope ou par la balance, l'espèce et la quantité de l'électricité qui le charge. Le taffetas est moins épais que le verre, mais aussi il est moins solide, d'où il résulte que ce condensateur prend toujours plus d'électricité que le précédent, et qu'il ne peut jamais résister à des charges aussi fortes; il est bon pour essayer le fluide des sources qui n'ont pas une grande tension.

Le *condensateur à lames d'or* (Fig. 326) n'est autre chose qu'un électroscope à lames d'or, sur lequel on adapte deux plateaux métalliques, minces et bien dressés; le supérieur cc' est mobile et s'enlève par un manche isolant, l'inférieur ff' est fixé à la garniture gg' de la cloche hh' , et la lame non conductrice qui les sépare est disposée avec beaucoup d'art et de soin. Après avoir séparé les plateaux, on les enduit successivement, avec un plateau, de plusieurs couches d'un vernis très liquide formé par la dissolution de la gomme laque dans l'alcool; ce vernis sèche, et la pellicule qu'il forme est suffisante pour arrêter l'électricité; son épaisseur n'est pas de un dixième de millimètre. Ainsi les plateaux sont presque en contact, et la

dissimulation de l'électricité est aussi complète qu'il soit possible; à cet égard, le condensateur à lames d'or est le plus parfait que l'on connaisse; mais les couches minces de vernis n'offrant que très peu de résistance, il ne peut supporter que les plus faibles charges. Par exemple, quand on a épuisé presque toute l'électricité des conducteurs de la machine, de manière qu'ils ne donnent plus aucun signe aux électroscopes les plus sensibles, si on les fait communiquer au plateau inférieur du condensateur, en mettant le plateau supérieur en communication avec le sol, et qu'après un instant on rompe les communications en commençant par celle du sol, puis qu'on enlève le plateau supérieur, on observera une grande divergence dans les lames; presque toute l'électricité qui restait aux conducteurs sera venue s'accumuler et se condenser dans le plateau inférieur. Cet appareil nous servira plus tard à une foule de recherches sur l'électricité, qui se développe soit par le simple contact des corps, soit par les actions chimiques auxquelles ils sont soumis. Pour les expériences délicates, il est bon de tenir la cloche du condensateur enveloppée d'une cage en verre, dans laquelle on dessèche l'air avec quelque corps absorbant.

377. *De la bouteille de Leyde, et des batteries électriques.* — Un vase en verre, revêtu à l'extérieur d'une feuille d'or en d'étain montant jusqu'à quelques pouces des bords, et pareillement revêtu à l'intérieur, ou seulement rempli de quelques substances conductrices, d'eau, de grenaille de plomb, de feuilles d'or ou de clinquant, forme ce qu'on appelle une *bouteille de Leyde* (Fig. 327), ou une *jarre électrique* (Fig. 328); la tige t s'appelle le *bouton*, le *crochet* ou l'*intérieur* de la bouteille, parce qu'elle sert en effet à mettre la face intérieure en communication avec le sol ou avec les sources électriques. Tout l'espace compris entre le goulot g et l'*armature extérieure* n'a été verni avec beaucoup de soin.

Pour charger la bouteille, on la tient à la main par la *panse* ou par l'*armature extérieure*, et l'on met le bouton en communication avec les conducteurs de la machine, soit au contact, soit plutôt à une petite distance, afin de voir jaillir une foule d'étincelles qui se succèdent rapidement d'abord puis qui se ralentissent de plus en plus, et qui indiquent ainsi le degré de la charge. L'électricité vitrée des conducteurs passe dans la bouteille, se répand sur toute la surface intérieure, et de là, agissant par influence à travers l'épaisseur du verre, elle décompose les électricités naturelles de l'*armature extérieure*, attire la résineuse, qui s'accumule et se condense sur la paroi de verre, et repousse la vitrée, qui s'écoule dans le sol par la main et par le corps, qui lui offrent un passage. On pourrait charger la bouteille en sens inverse, en tenant le crochet à la main, et en présentant la *panse* aux conducteurs; mais, dans tous les cas, la communication de l'une des faces avec le sol

n'est pas moins essentielle que la communication de l'autre avec la machine. Quelquefois la bouteille se décharge spontanément avec beaucoup d'éclat: tantôt l'étincelle part entre le bouton et l'*armature extérieure*; alors on peut recommencer la charge: tantôt elle part à travers l'épaisseur du verre; alors la bouteille est percée et hors de service.

Quand la bouteille est chargée, on la pose avec précaution sur un isoler, et l'on peut la décharger subitement avec l'excitateur (375), ou lentement, en tirant alternativement de la *panse* et du bouton une foule de petites étincelles.

L'électricité dissimulée ne reste pas sur les armatures intérieure et extérieure: elle les quitte pour s'attacher au verre, et se presser sur sa surface. C'est ce que l'on démontre au moyen de la bouteille à *armatures mobiles* (Fig. 329); après l'avoir chargée et posée sur un isoler, on enlève l'intérieur, qui n'emporte avec lui que très peu d'électricité; on enlève ensuite le verre, en laissant sur l'isolier l'enveloppe extérieure, qui ne donne pareillement que de faibles signes électriques; mais les deux armatures ayant été touchées et remises à l'état naturel, si l'on rapporte le verre dans l'*armature extérieure*, et l'*armature intérieure* dans le verre, la bouteille ainsi recomposée a presque la même charge qu'elle avait primitivement, ce qui prouve d'une manière frappante que, dans la séparation des pièces, ces deux électricités étaient restées attachées à la surface du verre; on pourrait encore s'en assurer en étendant une main dans l'intérieur du verre, et l'autre à l'extérieur, lorsqu'on vient de le déposer de ses armatures, car on ne manquerait pas de recevoir ainsi une forte commotion.

Lorsqu'on présente à la bouteille plusieurs conducteurs pour la décharger, l'électricité choisit toujours le meilleur: ainsi, en pressant avec une main, une chaise ou un fil de métal sur la *panse*, on peut impunément avec l'autre main apporter au bouton l'autre extrémité de la chaise ou du fil, la décharge passe par le métal et jamais par le corps; cependant il est toujours bon de s'assurer d'avance qu'il n'y a pas de solution de continuité dans le métal, ou qu'il n'est pas trop mince pour laisser passer tout le fluide; car un fil excessivement fin ne suffirait pas pour détourner le coup.

On mesure la charge d'une bouteille par la distance à laquelle jaillit l'étincelle entre le bouton intérieur et un autre bouton communiquant avec l'extérieur (Fig. 331); la tige tg est divisée, on l'avance doucement au moyen de la vis v , et l'on observe la distance à laquelle l'étincelle est partie. Pour que les expériences fussent comparatives, il faudrait que, la boule B restant la même, tous les boutons des diverses bouteilles eussent les mêmes dimensions.

Neus rapporterons maintenant diverses expériences dont on pourra facilement se rendre compte au moyen de ce qui précède.

Dans le carillon de la figure 332 l'un des timbres communique à l'extérieur de la bouteille, et l'autre à l'intérieur; la petite balle de métal est suspendue par un fil isolant, les oscillations sont d'autant plus rapides que la distance des timbres est plus petite; par un temps sec, et pour de médiocres charges on en peut toujours compter plusieurs centaines.

L'ornigane de *Franklin*, dont nous avons parlé (370) (Fig. 311), peut aller et venir entre les faces d'une bouteille ordinaire pendant plus d'un quart d'heure avant de l'avoir complètement déchargée.

Les figures de *Leichtenberg* semblent indiquer une différence essentielle entre les deux électricités résineuse et vitrée; on peut les obtenir avec un conducteur ordinaire communiquant à la machine, mais on les obtient plus belles et plus régulières au moyen de la bouteille de Leyde. Pour cela on prend une bouteille chargée et l'on trace des figures sur un gâteau de résine très sec, d'abord avec le bouton, qui contient par exemple l'électricité vitrée, et ensuite avec la ponce, qui contient l'électricité résineuse. Après cela, avec un soufflet qui contient un mélange de soufre et de minium très bien pulvérisé, on souffle sur le gâteau de résine et l'on distingue alors les traces électriques que la bouteille a laissées sur la résine. Les traces vitrées deviennent jaunes et les résineuses deviennent rouges, parce que dans la poudre mélangée le soufre est électrisé résineusement et le minium vitreusement. Ces traces sont très différentes: les jaunes sont comme *hérissées* en filets divergens, tandis que les rouges offrent partout des contours arrondis.

Le *perce-carte* (Fig. 330) offre un phénomène curieux; chaque pointe étant mise en communication avec l'une des faces de la bouteille, l'étincelle part et la carte est percée d'un trou plus grand qu'un trou d'épingle; des deux côtés, on observe autour du trou un petit bourrelet et des filaments tirés en dehors, comme si le fluide était parti du milieu de la carte pour sortir par ses deux faces. M. *Oersted* explique ce fait et beaucoup d'autres analogues, en supposant que l'électricité n'éprouve pas un mouvement de translation dans les corps, mais seulement un mouvement de vibration par lequel s'opèrent, autour de chaque molécule, des décompositions et recompositions successives; ainsi le fluide vitré qui se présente au point a décompose les fluides naturels des molécules qu'il rencontre, attire le résineux avec lequel il se recombine par une étincelle, repousse le vitré, qui va à son tour décomposer les fluides naturels des molécules suivantes, attirer le résineux pour se recombinaison avec lui par une nouvelle étincelle, et repousser le vitré; et ainsi de suite, de sorte qu'il y a autant d'étincelles que de molécules de matière pondérable: on peut rendre cette supposition enlaine en faisant passer la décharge électrique par

des grains de métal enfilés dans de la soie et séparés l'un de l'autre. Nous reviendrons plus tard sur cette importante théorie, qui semble confirmée par tous les faits de l'électricité chimique.

Le trou de la carte ne se fait pas à égale distance des deux pointes, mais, dans l'air ordinaire, il se fait toujours près de la pointe résineuse, et dans l'air raréfié sous la cloche de la machine pneumatique, il s'en éloigne pour se rapprocher de plus en plus de la pointe vitrée. Ce fait, constaté par M. *Trémery*, reste sans explication.

Pour percer le verre par la décharge électrique, on change un peu la disposition de l'appareil précédent, parce qu'il est alors nécessaire de mettre à l'extrémité de l'une des pointes une goutte d'un liquide conducteur, une goutte d'huile par exemple, qui touche immédiatement le verre dans une étendue un peu considérable. Le *perce-verre* est représenté dans la figure 340.

On enflamme les liqueurs spiritueuses avec la bouteille de Leyde plus sûrement qu'avec l'étincelle directe du conducteur de la machine. On peut même enflammer du coton roulé dans le lycopode ou dans la résine pulvérisée.

C'est au moyen de la bouteille de Leyde que l'on a essayé d'apprécier la vitesse avec laquelle le fluide électrique se transmet dans les corps. Des fils de métal isolés, dont l'ensemble forme une lieue, transmettent instantanément la décharge électrique; ces expériences furent faites en France et en Angleterre, de 1745 à 1750. A cette époque on essaya parallèlement la transmission de l'électricité par l'eau et par le sol sec ou humide: en partant d'un point donné, un fil de métal de plusieurs centaines de toises de longueur, isolé sur des piquets de bois très sec, s'en allait s'enfoncer dans le sol par son autre extrémité, après avoir traversé des rivières et des terrains de différentes natures; au point de départ, il était mis en communication avec l'une des faces de la bouteille; tandis que le sol était mis en communication avec l'autre face, les fluides ne pouvaient se joindre qu'après avoir traversé toute la longueur du fil métallique et toute l'étendue du sol et de l'eau, depuis la seconde extrémité du fil jusqu'au lieu de l'observation; et, malgré tant d'espace et tant d'obstacles, la décharge de la bouteille était instantanée, comme si elle eût été faite par l'excitateur ordinaire. Dans un point quelconque de cette longue chaîne, on pouvait enflammer des liqueurs spiritueuses, et c'était alors un spectacle fort étonnant de voir l'alcool s'enflammer par du feu qui venait de traverser une rivière.

La communication de la bouteille de Leyde est assez forte pour être dangereuse; elle passe par les bras et la poitrine, lorsque, une main tenant la pance de la bouteille, l'autre en vient toucher le bouton. Alors les faibles charges se font sentir dans l'avant-bras seulement, les charges un peu plus fortes se font sentir au coude, et les charges plus fortes en-

cure donnent une vive douleur à la poitrine. Pour faire passer la commotion entre deux points donnés du corps, il suffit d'établir des armatures sur ces deux points, c'est-à-dire des plaques de métal que l'on fait communiquer aux deux faces de la bouteille.

Lorsque plusieurs personnes forment la chaîne en se tenant par la main, si la première touche la pousse de la bouteille et la dernière le bouton, tout le cercle reçoit instantanément la commotion; les personnes qui sont au milieu éprouvent un choc un peu moins vif que celles qui touchent la bouteille. On était autrefois fort curieux de savoir jusqu'où pouvait s'étendre cette puissance du choc électrique; et après l'avoir tenté sur des cercles nombreux, on l'essaya sur un régiment rangé en bataille, qui fut, dit-on renversé d'un seul coup.

Les batteries électriques (Fig. 342) sont des réunions de plusieurs bouteilles de Leyde, ou de plusieurs jarres, dont tous les intérieurs communiquent au moyen des tiges de métal *t, t', t''*, et dont les extérieurs communiquent pareillement, par ce que le fond de la caisse en bois *B, B'*, sur lequel ils reposent, est une lame de plomb. Lorsqu'on veut charger ensemble plusieurs batteries, on fait communiquer tous les intérieurs entre eux et tous les extérieurs au sol; et pour juger le degré de charge, on emploie le petit électromètre à pendule (Fig. 330), qui s'ajuste sur les conducteurs de la machine; au commencement, et pendant les premiers tours du plateau, le pendule est presque au repos, parce que les batteries condensent tout le fluide qui se développe; mais peu à peu le pendule s'élève, et par les divers angles d'écart qu'il prend, on juge des divers degrés de sa tension électrique, et par conséquent des divers degrés de tension de l'intérieur des batteries, car celles-ci sont toujours dans le même rapport que les premières.

Une batterie peut se décharger comme la bouteille de Leyde, soit lentement, soit rapidement; mais il faut redoubler de précaution pour n'en pas recevoir le choc. L'épaisseur du verre des jarres et la tension de la machine restant les mêmes, la force d'une batterie peut être évaluée par l'étendue de la surface qui se charge; cent pieds carrés condensent cent fois plus d'électricité qu'un seul pied carré, et il faut un homme fort robuste pour soutenir, sans danger, le choc d'un pied carré chargé par une machine ordinaire.

Nous allons indiquer quelques-uns des phénomènes les plus remarquables, que l'on peut produire au moyen de ces grandes accumulations d'électricité.

Tous les corps qui reçoivent le choc sont placés entre les deux branches *b* et *b'* de l'excitateur universel, qui est représenté dans la figure 343. L'une de ces branches communique avec l'extérieur de la batterie au moyen de la chaîne *C*; l'autre commu-

nique avec une chaîne *C'* qui se termine à la boule isolée *B*; lorsqu'on veut faire passer l'étincelle, on prend la boule *B* par l'extrémité de son manche isolant, on l'approche subitement de l'intérieur de la batterie: l'étincelle part et les fluides se recomposent dans tout le circuit *B, C' & C*.

Un fil de fer de plusieurs poudres de longueur étant mis entre les branches de l'excitateur, une faible décharge l'échauffe, une forte le fait rougir, une plus forte le fait jaillir en petits globules fondus, qui sont lancés au loin, et une plus forte encore le fait disparaître en vapeur. Avec une puissante machine, Van-Marum en a fondu cinquante pieds de longueur.

Une bande étroite de feuille d'étain, de trois ou quatre poudres de longueur, est volatilisée par une batterie ordinaire, la vapeur s'oxide, et forme de longs filaments flottans dans l'air, semblables à des toiles d'araignée.

Les autres métaux peuvent aussi s'échauffer, rougir, se fondre et s'oxider; mais en les prenant de même longueur et de même diamètre, des charges égales ne produisent pas sur tous les mêmes effets; ceux qui sont plus mauvais conducteurs, comme le platine et le fer, éprouvent, à égalité de dimension de plus grands effets de chaleur que l'or et le cuivre, qui sont les meilleurs conducteurs.

Les fils de soie dorés présentent un phénomène singulier, qui montre avec quelle rapidité les molécules de matière conductrice sont saisies par le choc électrique: l'or qui les couvre est volatilisé et oxidé sans que la chaleur soit seulement capable de rompre la soie. Pour rendre cette expérience plus sensible, on appuie sur le fil une feuille de papier blanc, sur laquelle on voit, après le choc, une large trace de couleur brune. Par le même moyen, on peut enlever la dorure sur un livre ou sur une autre surface non conductrice, pourvu qu'elle n'ait pas trop d'étendue.

On se sert de cette propriété pour faire des empreintes électriques: de *pr* (Fig. 333) est une découpe en papier, à laquelle sont collées deux bandes de feuilles d'étain *F, F'*; d'un côté, on la couvre d'une feuille d'or, qui touche l'étain par deux de ses bords; de l'autre, on la couvre d'un ruban de satie; et pour assurer le contact, on met tout ce système sous la presse *p p'* (Fig. 334). Les deux bandes d'étain étant mises en communication avec les deux faces de la batterie, l'étincelle part, l'or se volatilise, et, par tous les jours de la découpe, il passe sur le ruban, où il fait une empreinte de couleur brune très régulière.

Les fortes charges font une impression remarquable sur les masses métalliques. Priestley a observé qu'elles en liquéfient la surface à l'endroit où elles les traversent, si le métal est peu fusible, ou n'aperçoit, après le passage de l'étincelle, qu'un cercle de fusion d'une ou deux lignes de diamètre; mais s'il est très fusible, comme le plomb, l'étain ou l'alliage de Barcet, on aperçoit autour du cercle

central jusqu'à trois anneaux de fusion, d'une largeur sensible, concentriques et séparés les uns des autres par des intervalles d'environ une ligne.

En répétant ces expériences curieuses, M. Fusinieri a constaté un autre fait, qui mérite toute l'attention des physiciens. C'est le transport des matières solides par le courant électrique (*Giornale di Fisica, Chimica*, etc., novembre 1825); par exemple, en disposant un disque d'argent poli à égale distance, entre une boule d'or qui communique avec l'intérieur d'une petite batterie, et une boule d'argent qui communique avec l'extérieur, on observe après la décharge deux taches d'or parfaitement égales en diamètre et en intensité, sur les deux faces du disque d'argent. Les autres métaux sont pareillement transportés au travers de tout l'espace que peut franchir l'étincelle, et ils viennent, sur toutes les surfaces qu'ils rencontrent, se déposer en couches très minces, tantôt à l'état d'oxide, tantôt à l'état métallique. M. Fusinieri a fait un grand nombre d'expériences intéressantes sur ce sujet; et il a observé que la matière pondérable qui est ainsi emportée et déposée par le courant électrique, paraît conserver une grande volatilité, car il arrive souvent que les taches qu'elle forme s'effacent avec le temps.

Quand l'étincelle passe dans un liquide, elle éclate et brille comme dans l'air; presque toujours le liquide est lancé de toutes parts avec une grande force.

Elle éclate de même dans la poudre à tirer, et en détermine l'explosion. L'on en peut faire l'expérience avec de petites cartouches de deux ou trois lignes de diamètre, et de quinze ou vingt lignes de longueur; deux fils de fer, traversant les bouts opposés de la cartouche, viennent aboutir vers son milieu, à une petite distance l'un de l'autre; c'est en franchissant leur intervalle que l'étincelle enflamme la poudre.

Dans les gaz l'étincelle produit une expansion si grande et si subite qu'elle peut lancer une petite balle au moyen du *mortier électrique*, qui est représenté figure 335. Kinnorsley, qui observa le premier ce phénomène remarquable, inventa aussi un appareil pour en mesurer l'intensité. C'est un tube en verre, fermé et armé par ses deux bouts (Fig. 341). L'étincelle part entre les deux boules *bb'*; et un liquide qui s'élève en même temps dans le tube latéral *tt'*, donne la mesure de l'expansion. Cet appareil se nomme le *thermomètre de Kinnorsley*.

Les mauvais conducteurs sont percés ou brisés par la décharge d'une forte batterie; une pierre

plate, de plusieurs lignes d'épaisseur, est percée comme le verre mince; un cylindre de bois, de deux ou trois pouces de diamètre et d'un demi-pouce d'épaisseur, peut être fendu en éclats par une décharge qui passe dans le sens des fibres.

A la surface de quelques substances l'étincelle laisse une traînée lumineuse qui brille pendant plusieurs secondes et quelquefois pendant plus d'une minute; cette espèce de phosphorescence est rouge ou violacée sur la craie, verdâtre sur le sucre, sur certains spaths calcaires cristallisés et sur le grès de Fontainebleau.

Il ne faut pas des batteries très fortes pour tner des nœuds, des lapins, et même des animaux de plus grande taille; ils tombent subitement, et l'observation anatomique n'a pu découvrir jusqu'à ce jour quels organes sont blessés; cependant, par les convulsions qu'ils éprouvent quand le choc est trop faible pour les tuer, on peut juger que le système nerveux est violemment attaqué.

378. Les piles électriques sont des espèces de batteries dont on ne charge que la première et la dernière face. La figure 336 représente une série de bouteilles de Leyde, tellement disposées, que l'extérieur de chacune communique avec l'intérieur de la suivante; l'intérieur de la première est en contact avec les conducteurs de la machine, et l'extérieur de la dernière en contact avec le sol. C'est ce qu'on appelle la charge par cascade. Un tel système forme une pile dont chaque bouteille est un élément; il se décharge en totalité lorsqu'on établit la communication entre les deux extrémités, l'étincelle est alors moins forte qu'il n'y avait qu'une seule bouteille; mais on peut aussi en décharger telle partie que l'on veut, ou même décharger chaque bouteille séparément. Si, après avoir isolé la pile, on cherche à reconnaître sa tension électrique, on n'y trouve que du fluide vitré à un bout et du fluide résineux à l'autre; toutes les bouteilles ou éléments intermédiaires paraissent sensiblement à l'état naturel. Cependant, si l'on brise la pile, en détachant un, deux, trois ou quatre éléments, chaque partie détachée, chaque fragment, sera une pile complète, montrant aux deux bouts les deux fluides contraires, et n'ayant au milieu aucune électricité sensible. Cette disposition des fluides est, comme on voit, tout-à-fait analogue à la disposition des fluides magnétiques. On peut construire une pile avec des carreaux de verre armés sur les deux faces, et communiquant entre eux par des bandes de feuilles d'étain. La figure 344 représente une pile de cette espèce.

CHAPITRE V.

DE LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE.

379. *Conditions générales pour que l'électricité donne de la lumière.* — Les plus grandes charges électriques accumulées sur les corps, soit directement, soit par dissimulation, ne donnent jamais aucune apparence lumineuse quand l'équilibre est établi et que le fluide est en repos. Ainsi, la première condition de la lumière électrique est le mouvement des fluides ou la rupture de leur équilibre. Cette condition, toujours nécessaire, n'est pas toujours suffisante; il faut encore que la tension des fluides qui détermine leur mouvement soit une force assez considérable. Par exemple, l'électricité d'une machine ordinaire ne donne point de lumière sensible quand elle s'écoule dans le sol par un fil de métal; tandis qu'une machine puissante peut environner d'une auréole brillante un fil de fer de cinquante pieds de long, communiquant au sol aussi parfaitement qu'il soit possible (Van Marum, *Description de la grande machine du musée de Teyler*). La tension nécessaire à la production de la lumière est tout-à-fait dépendante de l'état, de la forme et de la conductibilité du milieu dans lequel les fluides électriques doivent se mouvoir : quelquefois de faibles tensions donnent une lumière éclatante; d'autres fois, les plus fortes tensions que l'on puisse accumuler ne donnent pas la moindre apparence lumineuse.

380. *Lumière électrique dans l'air et dans les gaz sous la pression de l'atmosphère.* — La distance à laquelle on peut tirer l'étincelle d'un corps électrisé dépend surtout de la conductibilité de sa substance, de l'étendue de sa surface et de l'épaisseur de la couche électrique dont il est chargé; est la seule condition pour que l'étincelle parte, est que la tension de l'électricité puisse vaincre la pression de l'air. Dans les corps à formes anguleuses, cette condition se trouve remplie, même pour des charges assez faibles (386), et le fluide se dissipe spontanément, en formant des *aigrettes* de lumière, qui brillent dans les ténèbres, et dont les traits divergens ont quelquefois plusieurs pouces de longueur. Dans les corps à formes arrondies, il faut de très puissantes charges pour que l'étincelle parte d'elle-même; mais si en leur présence un conducteur communiquant au sol, il s'exerce à l'instant une action par influence : les fluides se déplacent en vertu de la conductibilité, s'accumulent en raison de l'étendue des surfaces, et l'étincelle jaillit dès que la pression de l'air est vaincue sur l'un ou l'autre des corps qui sont

mis en présence. Une machine est très forte quand elle peut, sans le secours des conducteurs secondaires, donner des étincelles à vingt ou trente pouces. A cette distance, la lumière électrique forme un sillon de feu dont les sinuosités sont tout-à-fait analogues aux zigzags de l'éclair.

Pour multiplier les étincelles que donne une machine, il suffit de multiplier les solutions de continuité du conducteur, par lequel le fluide s'écoule dans le sol. C'est sur ce principe que reposent tous les jeux de la lumière électrique.

Avec des *grains* de métal, enfilés dans de la soie, et maintenus par des nerds à quelques millimètres de distance, on peut composer des chaînes, des guirlandes ou des dessins qui paraissent resplendissants de feu pendant tout le temps que l'on tourne la machine avec laquelle ils communiquent. Entre le dernier grain et l'avant-dernier la lumière paraît au même instant qu'entre le premier et le second, tant est rapide la communication de l'électricité dans toute la longueur de la chaîne.

Les *tubes étincelans* (Fig. 338) se composent avec de petits lances de feuilles d'étain (Fig. 337), que l'on colle sur le verre, en approchant leurs pointes à de très petites distances l'une de l'autre; l'étincelle jaillit au même instant, entre tous ces lances, et le tube paraît illuminé dans toute sa longueur.

Les *carreaux étincelans* offrent à l'œil des dessins plus fins et plus variés : en les forme en collant sur un carreau de verre ordinaire de petites bandes de feuille d'étain, *bb'*, *cc'*, etc. (Fig. 340), qui forment un ruban continu, depuis *a* jusqu'en *z*; ensuite on élève, avec une pointe, toutes les parties de ces bandes qui se trouvent sur les contours du dessin que l'on veut rendre visible. Chacune de ces solutions de continuité est marquée par une étincelle lorsqu'on fait passer le fluide de la machine de *a* en *x*, ou de *a* en *z*. On peut de cette manière représenter avec assez de vérité des figures de toute espèce; c'était le grand amusement des électriciens du siècle dernier.

Le *carreau magique* est autrement disposé; l'une de ses faces est recouverte d'une feuille d'étain, et l'autre d'une espèce de vernis contenant beaucoup d'*oscurum*; l'électricité s'accumule par dissimulation; quand l'étincelle part, on voit sur la

face aventurinée des traits de feu qui serpentent dans tous les sens.

C'est aussi dans l'obscurité qu'il faut étudier les phénomènes des pointes : alors, quand on les met en communication avec les conducteurs d'une forte machine, on aperçoit de brillantes sigrettes, comme celle qui est représentée dans la figure 345. A l'extrémité de la pointe on ne distingue qu'un seul trait de feu, qui se divise à une petite distance et se ramifie en une foule de petits filets étincelants.

L'électricité résineuse ne donne jamais des sigrettes aussi divergentes et aussi allongées que l'électricité vitrée ; ce phénomène singulier est bien digne d'attention, puisqu'il semble offrir un caractère distinctif entre les deux fluides électriques.

Les pointes qui sont en communication avec le sol donnent aussi des sigrettes, même quand elles se trouvent à plusieurs pieds de distance des corps électrisés.

En tirant des étincelles un peu fortes sur un morceau de drap ou de soie couvert de poussière métallique, ou frotté avec des feuilles minces d'or ou d'argent, on observe des effets analogues à ceux du carreau magique. La lumière paraît en mille endroits à la fois, et se ramifie dans tous les sens sur l'étendue de sa surface.

Des pointes des corps conducteurs encore plus fines et plus rapprochées donnent une espèce de phosphorescence continue ; par exemple, les lames d'or très minces, collées sur du verre, du cuir ou du bois, paraissent illuminées pendant tout le temps que l'électricité les traverse, et sur certains corps mauvais conducteurs, la phosphorescence se prolonge pendant plusieurs minutes après le passage du fluide.

Ces apparences lumineuses que nous offre l'électricité des machines sont une imitation très faible, et cependant très exacte de plusieurs phénomènes qu'on observe dans le ciel et sur la terre au moment des orages. Elles nous serviront de principes pour expliquer, dans la Météorologie, toutes les formes de la lumière électrique, telles que l'éclair, les langues de feu qui paraissent au sommet des métaux ou sur les flèches des tours élevées, et une foule d'autres météores qui étaient, pour les anciens, un sujet d'effroi et de superstition.

381. *Lumière électrique dans le vide, dans les vapeurs et dans les gaz raréfiés.* — Un tube de huit ou dix pieds de longueur, dans lequel on a fait le vide, étant mis par l'une de ses extrémités en communication avec une machine ordinaire, et par l'autre en communication avec le sol, on aperçoit tout son volume intérieur éclairé d'une vive lumière. L'électricité, ne trouvant plus qu'une faible résistance dans l'air qui reste, se dissipe au large dans toute la capacité du tube, et s'écoule en marquant partout son passage par des traits de feu. Quand les communications sont bien établies, la

lumière paraît fixe et uniforme ; mais si à l'extérieur du tube on approche un corps conducteur, elle se porte vers lui, et en même temps elle prend plus d'éclat. Il arrive presque toujours qu'un tube qui a servi à ces expériences donne encore des espèces d'éclairs long-temps après avoir été séparé de la machine.

Pour observer les diverses apparences de la lumière électrique suivant les différents degrés de raréfaction de l'air, on emploie l'appareil qui est représenté dans la figure 347 ; c'est un vase en verre de forme ellipsoïde que l'on appelait autrefois *l'oruf philosophique* ; à l'une de ses extrémités il porte un tube à robinet, et à l'autre une tige à bonton. passot dans une boîte à cuir. Quand le vide est fait, aussi parfaitement qu'il soit possible, l'électricité passe librement en remplissant de lumière toute la capacité du vase ; quand on laisse rentrer un peu d'air, la lumière devient moins diffuse, elle se resserre, et forme entre les deux boutons *b* et *b'* des arcs de couleur pourpre ; une quantité d'air ou peu plus grande donne encore moins de diffusion à la lumière, et ainsi de suite jusqu'au moment où le fluide ne peut plus s'écouler qu'en jaillissant d'un bouton à l'autre sous forme d'étincelles.

Comme avec les meilleures machines nous ne pouvons faire le vide qu'à deux millimètres, il reste encore dans les expériences précédentes, une quantité d'air qui peut avoir une grande influence et sur la formation de la lumière et sur sa couleur. Le vide barométrique étant le plus parfait que nous puissions obtenir, il est curieux de voir si le passage de l'électricité au travers des vapeurs si rares du mercure produirait encore des phénomènes lumineux. Dès 1060, Picard avait remarqué qu'un baromètre devient lumineux lorsqu'on l'agit dans les ténèbres ; plus tard on a constaté que ce phénomène est dû à l'électricité qui se développe par le frottement du mercure contre les parois intérieures du tube ; enfin Cavendish imagina de faire un *double baromètre*, de manière que l'électricité donnée à l'une des cuvettes fût obligée de traverser le vide pour aller sortir par l'autre cuvette, et s'écouler dans le sol. Dans ce vide, plus parfait que les précédents, la matière électrique offre encore les mêmes phénomènes : elle remplit de lumière tout l'espace qu'elle traverse, et l'on reconnut que des tensions même très faibles sont suffisantes pour la faire passer du sommet de la première colonne au sommet de la seconde.

Les couleurs de la lumière électrique sont très changeantes, et les changements qu'elle présente sont dépendants de la force de l'étincelle, et de la pression du gaz qu'elle traverse ; cependant pour la même force et la même pression, il y a des gaz et des vapeurs qui semblent donner de préférence les teintes rougeâtres, tandis que d'autres donnent les teintes jaunes, bleues ou violacées.

382. *Causes de la lumière électrique.* — Quelques auteurs ont pensé que le fluide électrique, en s'ou-

vant de force un passage au travers des corps, les comprimait au point de les rendre lumineux; ainsi, d'après cette hypothèse, les vapeurs de mercure dans le vide barométrique seraient elles-mêmes comprimées et refoulées avec tant de violence, qu'elles dégageraient de la chaleur et de la lumière. Il n'y a point de faits positifs pour démontrer la fausseté de cette opinion, ni même son insuffisance.

Cependant il y a une autre supposition qui est aujourd'hui plus généralement admise, et qui nous semble plus vraisemblable; elle paraît avoir été faite, pour la première fois, par Ritzer, et elle a été depuis développée par un grand nombre de savans, surtout par MM. Davy, Ørsted et Berzelius. Elle consiste à regarder tous les atomes de la matière pondérable comme les élémens entre lesquels s'accomplissent toutes les décompositions et toutes les recompositions électriques; les atomes posséderaient primitivement l'un des fluides; les uns, que l'on appelle *électro-positifs*, posséderaient primitivement le fluide positif ou vitré; les autres, que l'on appelle *électro-négatifs*, posséderaient primitivement le fluide négatif ou résineux: les premiers, enveloppés de fluide neutre, auraient

attiré du fluide négatif, tandis que les derniers, au contraire, auraient attiré du fluide positif, de telle sorte qu'ils seraient l'un et l'autre à l'état naturel. Cela posé, imaginons une seule file d'atomes électro-positifs ou électro-négatifs, et l'un des fluides qui se présente pour la parcourir; il est évident qu'il se manifesterait subitement autant de petites étincelles qu'il y a d'atomes, à peu près comme il arrive à la chaîne des grains de métal dont nous avons parlé; pour plusieurs files d'atomes, le phénomène serait le même, et dans le vide du double baromètre, les atomes dispersés de la vapeur de mercure seraient la vraie cause de la lumière qu'on observe. Enfin, dans le vide absolu, on ne sait ce qui arriverait, car le fluide neutre étant homogène et sans solution de continuité, on ne peut rien dire des effets qu'il éprouve, puisqu'on ne sait rien sur le mode d'aggrégation des deux fluides qui le constituent.

Bien que cette hypothèse semble appuyée par tous les faits connus, il est bon cependant de la mettre à de nouvelles épreuves, et de la regarder plutôt comme un moyen de chercher la vérité, que comme la vérité elle-même.

CHAPITRE VI.

DU MOUVEMENT DES CORPS ÉLECTRISÉS.

383. Toutes les expériences précédentes nous conduisent à regarder la matière électrique comme un fluide subtil enveloppant les atomes des corps, et remplissant peut-être les intervalles plus ou moins grands qui existent entre eux. Ce fluide, dans son état neutre, exerce sans doute quelque action sur lui-même; mais jusqu'à présent les effets qui en résultent nous restent complètement inconnus; c'est seulement quand il est décomposé, qu'il se manifeste à nous par des phénomènes particuliers. Alors il exerce une action sur la matière pondérable, il lui imprime des mouvemens variés, et l'on croirait d'abord qu'il la sollicite directement par des forces attractives ou répulsives. Cependant un examen plus attentif nous fait voir que, si les atomes de matière sont agités par les fluides électriques, ils ne peuvent l'être que par une action indirecte de pression ou d'impulsion. De telle sorte que les mouvemens des corps électrisés ne sont que des mouvemens secondaires, dans lesquels la matière n'est point une puissance, mais une simple résistance, recevant passivement toutes les directions que lui imprime le fluide électrique. Et il est curieux de voir comment des masses pondérables peuvent être déplacées et emportées par un fluide impendérable.

384. *Mouvement des corps non conducteurs électrisés.* — Il ne paraît pas qu'il existe aucune attraction à distance, ni même aucune affinité entre le fluide électrique et la substance des corps non conducteurs; car tous ces corps perdent leur électricité dans le vide. D'après cela, si nous considérons deux balles de gomme laque, par exemple, chargées l'une et l'autre d'une même électricité et mises en présence, la seule force qui les sollicite, est la répulsion de toutes les molécules du fluide dont elles sont revêtues; l'effet immédiat de cette force serait donc d'écarter ces molécules, et de les disperser de toutes parts, si elles pouvaient se mouvoir librement; par exemple, si les deux balles étaient dans le vide, elles resteraient immobiles, tandis que leur électricité obéissant à sa répulsion propre, se disséminerait jusqu'aux limites de l'espace; mais, suspendues au milieu de l'air, qui est un mauvais conducteur, le fluide qui les couvre est arrêté dans tous les sens, ou plutôt, il trouve dans tous les sens une résistance à vaincre. Celle de ses molécules qui s'appuient sur l'air ne peuvent se mouvoir sans pousser l'air devant elles, et celles qui s'appuient sur la substance des balles de gomme laque ne peuvent se mouvoir non plus sans les pousser comme un obstacle qui s'oppose à leur

marche. C'est par ce double effet que les balles sont mises en mouvement et écartées l'une de l'autre.

Pour rendre le phénomène plus sensible, on pourrait concevoir que les balles de cire, comme laque, après avoir été électrisées, ont eu leur surface recouverte d'une couche de substance imperméable à l'électricité, de telle sorte que le fluide qui les charge soit comme emprisonné entre ces deux matières non conductrices. Alors il est évident que toutes les actions répulsives qui s'exercent entre les molécules électriques, se transmettent immédiatement aux molécules pondérables par le fait seul de la résistance passive qu'elles opposent. La couche d'air qui enveloppe les corps fait précisément l'office de cette couche imperméable à l'électricité.

On prouve, de la même manière, que les balles chargées de fluides contraires doivent être entraînées et attirées par l'effort que font les molécules de ces fluides pour se rejoindre.

Le même raisonnement s'applique à tous les corps non conducteurs quelle que soit leur forme ; et il est visible que, si un corps non conducteur, pris dans son état naturel, n'est jamais attiré ni repoussé par un corps électrisé, c'est simplement parce que ses fluides n'étant point décomposés par influence et séparés l'un de l'autre, il éprouve toujours deux actions contraires, l'une attractive, et l'autre répulsive, qui sont sans cesse égales et qui se détruisent.

385. *Mouvement des corps conducteurs électrisés.* — Nous avons vu (373) que, dans son état d'équilibre sur un corps conducteur, l'électricité forme une couche d'une certaine épaisseur, ayant deux surfaces, l'une qui s'appuie sur l'air environnant, et l'autre qui est libre dans la substance même du corps. Les molécules de la surface libre ne peuvent jamais, à elles seules, imprimer aucun mouvement à la matière pondérable, puisqu'elles ont la facilité de se déplacer dans toute la masse sans y éprouver aucune résistance sensible. Tous les mouvements des corps conducteurs électrisés sont donc le résultat des diverses pressions que le fluide exerce contre l'air, ou, en général, contre les enveloppes imperméables qui limitent leurs surfaces ; car on peut toujours assimiler l'air qui touche un corps conducteur à une enveloppe imperméable qui ferait corps avec lui. Cela posé, si l'on examine des sphères conductrices, il est visible que, chargées d'une même électricité, elles se repoussent surtout par les régions de leurs surfaces les plus éloignées l'une de l'autre ; tandis que, chargées d'électricités contraires, elles s'attirent, surtout par les régions les plus voisines ; ce n'est pas toutefois que les molécules de la surface libre aient aucune part au phénomène, car elles sont maintenues au lieu qu'elles occupent par des forces ou des répulsions contraires, qui prennent leur appui contre la couche d'air environnante.

Un corps conducteur, à l'état naturel, est toujours attiré par un corps électrisé, parce que ses fluides étant séparés par influence, et celui de nom contraire étant toujours appelé dans la région la plus voisine, l'attraction qui s'exerce sur lui est toujours plus efficace que la répulsion qui s'exerce sur l'autre à une distance plus grande.

386. *Mouvements produits par l'écoulement de l'électricité.* — Soit un pivot conducteur *c p*, communiquant à la machine (Fig. 340), on pose en équilibre une petite tige de métal *tt'*, dont les deux bouts sont aiguisés et recourbés en sens contraire ; et dès qu'on tourne la machine, cet appareil, que l'on appelle le *tournequin électrique*, prend un mouvement de rotation très rapide, comme si les extrémités des pointes étaient vivement repoussées. Le même phénomène se produit sur des tournequins à plusieurs tiges (Fig. 351) ; et, lorsqu'on est dans le ténacité, on observe, pendant le mouvement, des aigrettes de feu qui s'éclatent de chaque pointe. L'électricité résineuse et la vitrée présentent une différence à l'égard de la lumière (380), mais elles n'en présentent aucune à l'égard du mouvement. Cette rotation curieuse s'explique de la manière suivante :

Le fluide électrique, répandu partout sur la surface des tiges du tournequin, exerce partout une pression sur l'air environnant, comme l'eau et les autres fluides pondérables pressent, dans tous les points, les parois des vases qui les contiennent ; si le fluide électrique ne trouvait point d'issue, les pressions opposées seraient toujours égales et l'appareil resterait au repos ; mais dès qu'il s'écoule par une pointe, il n'exerce plus de pression sur l'orifice de l'écoulement, et la pression qui s'exerce au point opposé détermine le mouvement par un véritable *récul*, tout-à-fait pareil à celui qui s'exerce dans le tournequin à jet ou dans le tournequin hydraulique.

387. *Mouvements produits par une décomposition instantanée.* — Concevons une sphère conductrice, de cuivre par exemple, communiquant au sol par un fil très fin, et posé sur un plan non conducteur indéfini, où elle n'est retenue que par son poids ; imaginons qu'au-dessous d'elle, à une certaine distance, on dispose un corps capable de recevoir ou de conserver les plus fortes charges électriques. Il est évident que, si la sphère est très petite, elle sera emportée par l'attraction qu'elle éprouve, et viendra de bas en haut, malgré son poids, se précipiter sur le corps qui la sollicite par influence ; mais il est évident aussi que, son diamètre et son poids augmentant, il arrivera une certaine limite où la puissance électrique sera tout-à-fait insuffisante pour la soulever ; l'étincelle partira entre elle et le corps électrisé qui la sollicite sans qu'elle en reçoive le moindre mouvement, à peu près comme l'étincelle part des conducteurs de la machine sans qu'ils soient entraînés et arrachés de leurs supports.

Cependant on observe des effets de la foudre qui semblent contraires à ce principe : on a vu souvent de grandes masses transportées à plusieurs centaines de pas, et surtout des pièces de métal arrachées de leurs scellements par un effort équivalent à plusieurs milliers de kilogrammes. Ces phénomènes me paraissent dépendre d'une différence dans la décomposition des fluides naturels par des actions lentes ou par des actions subites. Dans le premier cas, la conductibilité suffit au déplacement des fluides, et ils ont le temps de se

transporter et de s'arranger à la surface, où ils exercent contre l'air une pression qui est bientôt capable de le repousser ; dans le second cas, tous les atomes de la masse éprouvent, simultanément et anbitement, une décomposition de leurs fluides naturels ; ils sont saisis avec tant de violence que l'arrangement voulu par les lois de l'équilibre n'a pas le temps de s'accomplir, et les masses sont ainsi entraînées par des forces incomparablement plus grandes que celles qui pourraient trouver leur point d'appui contre l'air.

CHAPITRE VII.

DES DIVERSES CAUSES QUI DÉVELOPPENT DE L'ÉLECTRICITÉ.

388. Nous avons vu que deux surfaces quelconques s'électrisent par le frottement, l'une prenant le fluide vitré et l'autre le résineux ; nous avons vu pareillement que la tension de l'électricité qui se développe dans ces circonstances, dépend de la nature des corps, de l'état de leur surface et de leur température ; c'est sur ces principes que repose la construction des machines, et bien que nous puissions, par leur disposition présente, accumuler de grandes charges électriques en frottant des plateaux de verre poli contre des coussins de quelques pouces carrés d'étendue, il est probable que de nouvelles recherches sur ce point important nous fourniront des moyens encore plus efficaces d'activer la décomposition des fluides et par conséquent de produire des tensions plus fortes. Les théories qui expliquent si complètement la distribution des fluides électriques sur les corps, leur équilibre et leurs mouvemens, nous laissent dans une ignorance absolue sur les causes premières de leur séparation. Pourquoi le frottement donne-t-il naissance à l'électricité ? c'est une question qu'aucune théorie ne peut résoudre. Ainsi, de nos jours, les physiiciens sont réduits, comme antrefois, à faire des essais, et à tenter au hasard des expériences qui déterminent enfin quelques conditions précises de ce phénomène fondamental. L'énumération de toutes les causes qui développent de l'électricité est le seul secours que la science actuelle puisse offrir à leurs recherches. L'électricité n'est pas seulement développée par le frottement, elle l'est encore par la pression, par la chaleur, par la contact et par les affinités moléculaires.

389. Développement de l'électricité par pression.

— On pose un disque de métal sur un taffetas comme on le relève ensuite, au moyen d'un manche isolant, après l'avoir un peu pressé, et l'on trouve

de l'électricité résineuse sur ce disque, et de la vitrée sur le taffetas. Cette expérience, que l'on doit à M. Libes, n'offre pas un caractère décisif. L'adhérence qui s'établit entre la surface du métal et la surface visqueuse du vernis produit un effet assez analogue au frottement. Mais M. Haüy est parvenu à développer de l'électricité dans un grand nombre de corps à surfaces lisses et polies, dans de telles circonstances, que le phénomène est bien certainement dû à la pression et non pas au frottement. Par exemple, un fragment de spath calcaire, à faces parallèles, étant pressé un instant entre les doigts, acquiert une charge très sensible d'électricité vitrée ; il en est de même de la topaze, de la chaux fluatée, du mica, de l'aragonite, du quartz et de plusieurs autres substances. Toutefois l'espèce d'électricité qu'elles prennent dépend de la nature du corps qui les presse. M. Haüy a découvert en même temps une propriété très curieuse des cristaux électriques par pression ; c'est la faculté qu'ils ont de conserver leur électricité pendant plusieurs heures et quelquefois même pendant plusieurs jours. La chaux carbonatée est, sous ce rapport, la substance la plus remarquable ; elle possède une telle force conservatrice, qu'après avoir été pressée un instant, elle donne encore, au bout de onze jours, des signes électriques sensibles (*Annales de Chimie*, tome 5). C'est sur cette propriété que repose la construction de l'aiguille électrique de M. Haüy, représentée dans la figure 350 ; elle ressemble à l'aiguille ordinaire, avec cette seule différence, qu'à l'une des extrémités, au lieu d'un petit globule de métal, se trouve adaptée une petite lame de chaux carbonatée cr, que l'on électrise en la pressant entre les doigts ; cet électroscope, conservant très bien sa forme primitive, est un des plus simples et des plus commodes pour comparer approximativement les tensions

cette branche féconde de la physique, qui est maintenant connue sous le nom de *galvanisme*. Il reconnut, d'abord, que les grenouilles, coupées, dépoignées et suspendues, comme nous l'avons dit, n'éprouvent pas des convulsions permanentes : pour que leurs membres s'agitent, il faut que le vent, ou quelque autre cause accidentelle, vienne mettre quelque point de leurs muscles en contact avec la tige de fer qui porte le crochet de cuivre. Cette condition est indispensable, et l'on peut s'en assurer par l'expérience : pour cela, on coupe une grenouille vivante ; on la dépouille rapidement, et, passant la pointe des ciseaux sous les deux nerfs lombaires qui paraissent comme des fils blancs de chaque côté de la colonne vertébrale, on enlève, en deux coups, les deux ou trois vertèbres intérieures ; ainsi, les nerfs lombaires sont mis à nu, et forment la seule attache qui lie encore les membres inférieurs aux vertèbres supérieures ; on fil de cuivre, qui passe entre les deux nerfs et qui les touche, va s'accrocher à un fil de fer recourbé et assez long pour venir toucher les jointures ou les muscles. A chaque contact, les jambes se replient et s'agitent, et cette moitié d'une grenouille morte semble reprendre vie pour sauter. Ces effets peuvent se reproduire encore au bout de quelques heures ; mais le plus souvent les convulsions s'affaiblissent assez promptement, et, après vingt ou trente minutes, on n'observe plus que de légères palpitations dans la fibre des muscles.

Voilà donc un fait régulier, constant et bien caractérisé, dont on connaît les conditions, et qui peut se reproduire à volonté ; c'est en établissant ce point fondamental que Galvani a ouvert une nouvelle carrière, et distingué les commotions dont il s'agit de ces mouvements vagues et convulsifs que l'on observe souvent dans les insectes, les reptiles et les poissons, long-temps après les diverses mutilations qu'on leur a fait subir. Préoccupé de quelque système sur un fluide nerveux ou sur un fluide vital, Galvani ne tarda pas à imaginer une explication du phénomène, qui fut en rapport avec ses idées du moment. Les commotions de la grenouille, dit-il, sont excitées par un fluide qui passe des nerfs aux muscles, au moyen de la communication extérieure que l'on établit entre eux ; ce fluide existe dans les nerfs, il traverse l'arc conducteur, c'est-à-dire le crochet de cuivre et la tige de fer, et vient à l'instant du contact se précipiter sur les muscles, et les contracter à peu près comme ferait un décharge électrique.

L'explication est séduisante : elle fut accueillie avec transport, et le fluide nouveau fut appelé *fluide galvanique*.

Le bruit de cette découverte se répandit bientôt en Allemagne, en France et en Angleterre ; partout on s'empressa de répéter, de varier les expériences ; le phénomène lui-même excitait une grande admiration ; mais l'espérance de saisir, dans les corps

animés, un fluide subtil, un principe de vie, donnait encore une nouvelle ardeur à l'active curiosité des savans. D'ailleurs, ces idées paraissaient à une époque de grandes découvertes et de grandes réformes ; tous les esprits étaient en mouvement et comme emportés par l'attrait de la nouveauté.

On reconnut d'abord une analogie remarquable entre le fluide galvanique et le fluide électrique ; c'est qu'on n'obtient jamais de commotions dans les grenouilles, lorsqu'on établit la communication entre les nerfs et les muscles au moyen des corps mauvais conducteurs de l'électricité. Dès lors, il s'éleva une discussion parmi les physiiciens ; les uns soutenaient, avec Galvani, qu'une analogie n'est pas une identité, et que le fluide nouveau, bien qu'il ne pût traverser ni le verre ni la résine, n'était pas moins un fluide vital, distinct des fluides qui se développent dans la nature inorganique ; les autres étaient loin de supposer qu'un seul fait, commun entre deux causes, pût établir leur identité : mais ils demandaient qu'on leur montrât des effets galvaniques qui ne pussent être produits par l'électricité ; ajoutant, avec raison, qu'une faible étincelle agit, comme le galvanisme, pour donner aux grenouilles de vives commotions. Malgré cette différence d'opinions, l'on s'accordait volontiers à regarder les corps vivans comme chargés d'un fluide électrique ou non électrique, et à les assimiler, en quelque sorte, à une bouteille de Leyde, les nerfs représentant l'intérieur de la bouteille et les muscles l'extérieur. En même temps, on poursuivait de toutes parts les expériences sur des animaux de toute espèce pour observer leur sensibilité galvanique et la variété des phénomènes qu'ils présentaient, lorsqu'on établissait la communication entre leurs muscles et leurs nerfs au moyen d'un arc conducteur. Tous les corps vivans éprouvent, dans ces circonstances, des effets plus ou moins remarquables : souvent même il n'est pas nécessaire de dénuder ni les muscles ni les nerfs ; par exemple, une pièce de cuivre étant posée sur la langue et une pièce de fer dessous, on éprouve une sauteur très prononcée à l'instant où les deux pièces se touchent ; il se trouve des personnes assez sensibles pour voir en même temps une lueur passer devant leurs yeux.

Toute hypothèse est bonne quand elle fait faire des découvertes, et l'hypothèse de Galvani eut son moment de succès ; mais pour la rendre féconde, il fallut admettre des considérations vagues, des données incertaines ; il fallut se jeter dans des questions compliquées sur les fonctions vitales et sur les mystères de l'organisation ; ces questions sans cesse agitées parmi les hommes, et toujours insolubles, commençaient à reprendre vogue ; les meilleurs esprits s'y laissaient entraîner ; et l'on ne sait combien de fausses routes auraient été ouvertes à l'esprit humain, ni avec quelle ardeur on s'y serait jeté, si un homme d'un génie hardi n'eût mis un terme à toutes ces vaines tentatives. Cet homme

fut Volta. Déjà célèbre par plusieurs découvertes ingénieuses sur l'électricité, Volta, professeur à Pavie, répétait, avec une inquiète attention, toutes les expériences de Galvani et de ses disciples; plein d'enthousiasme pour les faits, il ne donnait qu'une adhésion conditionnelle aux hypothèses; enfin, il vint, avec une admirable sagacité, une condition du phénomène dont l'importance avait échappé jusque-là aux plus habiles observateurs. Quand l'arc conducteur, qui établit la communication entre les muscles et les nerfs, est d'un seul métal, la contraction est toujours peu sensible; au contraire, elle est toujours vive et forte quand l'arc conducteur est composé de deux métaux. L'expérience en est représentée dans la figure 352: la partie ombrée de l'arc est en zinc, l'autre est en cuivre; il importe que les métaux soient nets et bien décapés au point où ils touchent la grenouille et surtout au point où ils se touchent entre eux. Cette condition posée, Volta en tire la conséquence suivante: Il est vrai, dit-il, qu'il y a du fluide en jeu dans cette expérience; mais la grenouille n'est point une bouteille de Leyde; le fluide qui l'agite n'est point dans ses muscles ni dans ses nerfs, il est dans les métaux; il se développe par leur contact, et il n'est autre chose que du fluide électrique ordinaire. Une idée aussi contraire à tout ce que l'on connaissait alors sur les propriétés électriques et sur la conductibilité des métaux, ne pouvait être admise sans opposition; il est vrai que l'hypothèse de Galvani était épuisée; elle ne produisait plus de faits nouveaux, mais elle avait l'avantage d'expliquer tous les faits connus, et d'établir entre eux une liaison séduisante. Les opinions furent partagées. A quoi servent les deux métaux, disaient les artisans de Galvani, si ce n'est à établir une communication plus complète entre les muscles et les nerfs, et à donner au fluide un écoulement plus libre? A quoi pourraient-ils servir, répondaient les artisans de Volta, s'il n'y avait qu'une communication à établir; un seul métal ne servirait-il pas autant? Et, de part et d'autre, on tentait des expériences nouvelles, autant, peut-être, pour soutenir son opinion qu'on avait adoptée que pour la mettre à l'épreuve; car il y a aussi dans les discussions scientifiques une sorte de conviction prématurée, laquelle on se laisse trop souvent entraîner. Galvani, sans nier l'efficacité des deux métaux, essayait de démontrer qu'un seul métal excite des contractions; et, en effet, une grenouille, préparée et jetée sur un bain de mercure, éprouve des palpitations très sensibles; elle en éprouve pareillement lorsqu'on touche à la fois les muscles et les nerfs avec un plomb très pur, ou avec un autre métal dans lequel l'analyse chimique ne découvre rien d'étranger. Loiu de contester ces phénomènes, Volta les annonçait lui-même, et il en tirait des preuves à l'appui de son opinion. Il est vrai qu'un seul métal agit; mais frottes-en l'extrémité sur un autre métal, il agira encore avec beaucoup plus d'énergie.

Les parcelles imperceptibles qui s'y attachent lui donnent une hétérogénéité suffisante; c'est au contact du métal et de ces parcelles étrangères que l'électricité se développe. Ce qui est homogène pour l'analyse chimique n'est point homogène absolument; et, d'ailleurs, si l'air ou la nature pouvaient nous donner un métal d'une pureté parfaite, ce métal agirait encore; dès qu'il touche les muscles ou les nerfs, il y a hétérogénéité aux points du contact, et, par conséquent, de l'électricité produite. Enfin, la substance des muscles et celle des nerfs sont assez différentes entre elles pour donner de l'électricité quand elles se touchent; et, en effet, en repliant les muscles cruraux sur les nerfs lombaires, on obtient des palpitations sensibles, surtout si la grenouille est très vive et très rapidement préparée.

393. *Preuves directes du développement de l'électricité par le contact.* — L'idée du développement de l'électricité au contact des corps hétérogènes ne s'accréditait que lentement; la sévérité des théories physiques en réclamait des preuves encore plus directes et plus décisives, et Volta ne fut pas longtemps à les produire. Un appareil qu'il avait inventé quelques années auparavant lui en fournit les moyens; c'est le condensateur que nous avons décrit (378), et qui est représenté figure 328.

L'expérience se fait de la manière suivante: Après s'être assuré que le condensateur garde bien le fluide qu'on lui donne, et après l'avoir remis à l'état naturel, on établit, avec les doigts mouillés, une communication entre son plateau supérieur et le sol; en même temps une plaque de zinc, communiquant pareillement au sol, est mise en contact avec le plateau inférieur; un seul instant suffit, on rompt les communications, on enlève le disque supérieur, et l'on observe une divergence sensible dans les lames d'or. D'où vient cette électricité? Il est évident qu'elle n'a pu être développée qu'au contact du cuivre avec la lame de zinc; c'est là qu'une force particulière a exercé son action pour séparer les fluides naturels et pour les mettre en mouvement; le fluide vitré qu'elle a fait passer sur le zinc s'est écoulé dans le sol; le fluide résineux qu'elle a posé sur le cuivre du plateau inférieur s'y est accumulé par dissimulation, en agissant sur les fluides naturels du plateau supérieur; et, ce plateau étant enlevé, toute l'électricité résineuse, dissimulée dans le plateau inférieur, se répand librement, passe dans les lames, et produit la divergence qu'on y observe.

En substituant à la lame de zinc une lame de même métal que le plateau, nul effet n'est produit. Mais tous les autres métaux produisent une divergence dans les lames; le plomb, l'étain, le fer, le bismuth et l'antimoine prennent, comme le zinc, l'électricité vitrée, et donnent au plateau une charge résineuse; tandis que l'or, l'argent, le palladium et le platine produisent un effet contraire; ils prennent une charge résineuse, et donnent au

cuivre du plateau une charge vitrée. Ces expériences sont décisives; mais elles ne donnent pas encore de la force qui développe l'électricité l'idée complète que l'on doit en avoir; car on pourrait supposer qu'elle agit seulement à l'instant du contact, et qu'elle dérive peut-être du frottement ou de la pression qui s'exerce alors entre les surfaces métalliques. Pour lever tous les doutes à cet égard, Volta eut l'ingénieuse idée de faire une *plaque double* (Fig. 357), dont les deux moitiés, l'une en zinc et l'autre en cuivre, se trouvent soudées à la jonction *ss'*. Or, en prenant à la main le zinc de cette plaque, et en touchant avec son cuivre le plateau inférieur du condensateur, tandis que le plateau supérieur communique au sol, on obtient la même divergence dans les lames que si le zinc eût immédiatement touché le cuivre du plateau. Donc, dans la plaque double, après des années de contact, la force agit encore entre le zinc et le cuivre, comme si ces deux métaux venaient de se toucher à l'instant.

394. *De la force électromotrice.* — Cette force nouvelle, qui s'exerce entre les substances hétérogènes, est ce qu'on appelle la *force électromotrice*; elle naît du contact, elle réside à la surface de jonction, et là, elle agit pour décomposer l'électricité naturelle, séparant sans cesse les deux fluides, faisant passer le vitré sur l'un des corps et le résineux sur l'autre. Ainsi, la plaque double (Fig. 357) étant isolée, il est impossible qu'elle soit jamais à l'état naturel. Voici les principaux caractères de cette force :

Elle produit la décomposition des fluides naturels et empêche leur recombinaison; par le premier effet, le fluide vitré est poussé sur le zinc, se disperse sur toute son étendue en vertu de sa répulsion propre, tandis que le fluide résineux est pareillement poussé et dispersé sur le cuivre; par le second effet, ces fluides contraires sont maintenus en présence, l'un à droite, l'autre à gauche de la surface de contact, sans pouvoir franchir cette surface et se recomposer en vertu de leur attraction mutuelle. Pour avoir une idée plus précise de cette résistance, on peut concevoir un moment qu'il n'y ait pas de décomposition au contact, et que l'on donne artificiellement un peu de fluide vitré au zinc; alors ce fluide ne passerait pas sur le cuivre, la force électromotrice serait comme un obstacle pour l'arrêter; si, au contraire, on donnait au zinc un peu de fluide résineux, il est probable que ce fluide passerait en totalité sur le cuivre : on aurait les phénomènes inverses en électricisant le cuivre, résineusement ou vitreusement.

Comme obstacle à la recombinaison, la force électromotrice a une limite; c'est-à-dire qu'elle n'est pas capable d'arrêter des charges quelconques de fluide vitré sur le zinc, ou de fluide résineux sur le cuivre; dès que ces charges, acquises naturellement par le contact ou données artificiellement, atteignent une certaine tension, elles

peuvent franchir la surface de jonction pour se répandre au large ou pour se recombinaison; mais, dans ce cas, la force électromotrice arrête encore tout ce qu'elle peut arrêter. On admet qu'en représentant, en général, par $+t$ la tension du fluide vitré qui se trouve sur le zinc, et par $-t'$ la tension du fluide résineux qui se trouve sur le cuivre, la différence $t+t'$ des deux tensions est une quantité constante, quelles que soient les charges de fluide vitré ou résineux. Si le cuivre était chargé de fluide vitré comme le zinc, sa tension serait alors représentée par $+t'$, et la différence $t-t'$ serait encore la même. C'est cette différence des deux tensions que l'on appelle *tension maximum*, parce qu'elle est en effet le maximum de ce que la force électromotrice peut arrêter et retenir pour empêcher l'équilibre ordinaire.

Comme cause de décomposition, la force électromotrice est instantanée et permanente; parce qu'elle est toujours prête à agir dès que la tension n'est pas ce qu'elle doit être pour l'équilibre galvanique; et instantanée, parce qu'il ne lui faut qu'un instant insaisissable pour porter cette tension à son maximum. On reconnaît que cette tension est très faible, parce qu'une lame de zinc ne charge pas le condensateur lorsqu'elle est isolée, tandis qu'elle le charge en un instant lorsqu'elle communique au sol.

Les tensions électriques, développées et retenues par la force électromotrice, ne sont pas les mêmes au contact de tous les corps. Les métaux sont bons *électromoteurs*, bien que l'on observe entre eux des différences très marquées; et l'on dit, en général, que les autres substances ne sont point électromotrices, parce qu'en effet elles ne produisent au moyen du condensateur que des résultats insensibles : mais, lorsqu'on les éprouve avec des instruments plus délicats, on reconnaît qu'elles développent aussi de l'électricité par le contact; seulement, les tensions qu'elles produisent sont incomparablement plus faibles que celles des métaux.

Ainsi, la force électromotrice découverte par Volta est une force universelle qui s'exerce au contact de toutes les molécules des substances hétérogènes, qui décompose sans cesse les fluides électriques, et qui donne naissance à des forces nouvelles, dont les effets se font sentir à la manière pondérable. Or, les éléments qui composent la terre, soit à sa surface, soit à diverses profondeurs, sont mêlés et confondus de telle sorte qu'il y a partout hétérogénéité entre les parcelles qui se touchent : combien de substances diverses sont mises en contact dans les plus petits des êtres organisés, et combien de réactions électriques s'y doivent développer! La terre végétale, les pierres, les roches, les laves, les couches géologiques, sont-elles autre chose qu'une aggrégation de principes différents, entre lesquels la force électromotrice doit agir aussi avec plus ou moins d'intensité? On

perçoit, d'une seule vue, tout ce qu'il y a de second dans cette découverte, et nous verrons que les premiers observateurs n'ont pas été trompés

dans leurs espérances, quand ils ont cru que les principes du galvanisme deviendraient la clef d'une foule de phénomènes.

CHAPITRE IX.

DE LA PILE DE VOLTA.

395. *Principes sur lesquels repose la construction de la pile.* — La pile se construit avec trois corps différens : deux sont métalliques et bons électromoteurs, et le troisième est non métallique, bon conducteur et très faiblement électromoteur.

Les métaux qu'on emploie avec le pins d'avantage sont le zinc et le cuivre, le premier forme les *éléments positifs* de la pile, le deuxième les *éléments négatifs* ; deux éléments réunis ou soudés ensemble, l'un positif et l'autre négatif, composent ce qu'on appelle une *paire* ou un *couple*.

Le corps non métallique est ce qu'on appelle le *conducteur* ; tantôt c'est une *rondelle humide*, c'est-à-dire une rondelle de drap ou de carton imbibée d'eau pure ou de quelque dissolution acide, alcaline ou saline ; tantôt c'est la dissolution elle-même ; d'autres fois c'est un corps sec, et alors la pile est ce que l'on appelle une *pile sèche*.

Concevons une plaque de cuivre, ou un élément négatif, communiquant en sol par le fil conducteur non métallique représenté par *f* (Fig. 358). Sur sa surface supérieure posons une plaque de zinc de même dimension : à l'instant du contact, la force électromotrice exerce son action ; le fluide résineux qu'elle développe passe sur le cuivre, et s'écoule dans le sol ; le fluide vitré au contraire passe sur le zinc, et s'y accumule jusqu'à ce qu'il y ait acquis la tension maximum que la force électromotrice soit capable de retenir ; il ne faut pour cela qu'un moment inappréciable ; cette tension, on plutôt l'épaisseur électrique qui la produit, étant prise pour unité, nous dirons que le cuivre est à l'état naturel, tandis que le zinc est converti d'une épaisseur 1 d'électricité vitrée. Si par quelque moyen nous allions enlever au zinc une partie du fluide qui le couvre, il n'aurait plus l'épaisseur 1 qu'il doit avoir ; la force électromotrice le reproduirait à l'instant par un nouveau développement qui réparerait exactement la perte, et par un égal développement de résineux qui s'écoulerait dans le sol. A chaque portion de fluide que l'on viendrait de la sorte enlever au zinc, il y aurait une réparation subite pour reproduire sans cesse l'épaisseur 1, qui est l'état de l'équilibre galvanique ; et si l'on établissait par exemple la communication du zinc avec le sol par un fil non métallique,

son fluide vitré s'écoulerait sans cesse, et serait sans cesse réparé ; en même temps le fluide résineux développé sur le cuivre s'écoulerait de même ; tellement que, si l'on approchait l'un de l'autre les deux fils non métalliques qui touchent le zinc et le cuivre, les fluides se recomposeraient à leur point de contact, et l'on aurait une *circulation* électrique continue ; les fluides seraient séparés au contact des métaux, et recomposés au contact des fils conducteurs non électromoteurs qui communiquent avec eux.

Cela posé, laissons le cuivre seulement communiquer au sol, et sur le zinc plaçons une rondelle humide. Il est évident qu'elle partagera l'électricité vitrée du zinc, mais que, la perte étant réparée à l'instant, l'épaisseur sera 1 sur la rondelle et sur le zinc, comme elle était d'abord.

Il en sera de même encore si nous posons une plaque de cuivre sur la rondelle humide, puisqu'il n'y a point de force électromotrice entre ces corps.

Mais si nous posons une deuxième plaque de zinc sur cette première plaque de cuivre, le phénomène sera plus compliqué, et c'est ici que se montre le véritable principe de l'accumulation de l'électricité dans la pile. Supposons pour un moment que l'action de la force électromotrice soit suspendue dans ce deuxième couple : alors il est évident que le zinc prendrait une épaisseur 1 de fluide vitré, comme l'a fait la rondelle humide et la plaque de cuivre, et dès que la force électromotrice agira, cette épaisseur deviendra égale à 2 sur ce 2^e zinc, puisqu'elle doit toujours excéder de 1 celle du cuivre avec lequel il est en contact. En même temps le fluide résineux qui sera développé sur le cuivre sera détruit par le vitré qui s'y trouve, et il se fera dans le premier couple un nouveau développement par lequel le 1^{er} zinc sera ramené à une épaisseur 1, ainsi que la rondelle humide et le 2^e cuivre. Au moyen de cet arrangement, le 2^e zinc doit donc avoir pour son équilibre une épaisseur de fluide vitré double de celui qui se trouve sur le premier.

On voit que par le même principe la 2^e rondelle humide et le 3^e cuivre auront la même épaisseur 2, tandis que le 3^e zinc aura une épaisseur 3. Le 4^e

sine aura une épaisseur 4, le 5^e, une épaisseur 5, etc., le 10^e une épaisseur 10.... le 100^e une épaisseur 100...., et le 1000^e une épaisseur 1000.

Ainsi, rien ne limite l'épaisseur électrique que l'on peut accumuler au sommet d'une semblable pile, puisque rien ne limite le nombre des éléments que l'on peut superposer; et le 1^{er} sine étant, comme nous l'avons vu, une source inépuisable d'électricité vitrée dont l'épaisseur est 1, le 1000^e sine est une source inépuisable dont l'épaisseur se trouve égale à 1000. Telle est l'admirable invention au moyen de laquelle Volta est parvenu à développer et accumuler une épaisseur électrique indéfiniment croissante sans frottement ni pression, et par la seule puissance du contact de certains corps disposés dans un ordre déterminé. La pile que nous venons de construire est nommée *pile de colonne*: nous continuerons de nous en servir pour démontrer plusieurs propriétés remarquables qui sont communes à toutes les piles dont nous verrons plus loin la construction.

396. *De la pile isolée.* — L'extrémité de la pile qui se termine par une plaque de sine s'appelle *l'extrémité zinc, l'extrémité positive, ou le pôle positif*: celle qui se termine par le cuivre s'appelle *l'extrémité cuivre, l'extrémité négative, ou le pôle négatif*. Dans la disposition dont nous venons de parler, le pôle négatif communiquait au sol, le pôle positif était isolé, et sur toute la pile il y avait du fluide vitré dont l'épaisseur allait croissant, depuis le 1^{er} sine où elle était 1, jusqu'au 100^e sine où elle était 100, en supposant que la pile eût 100 couples. Concevons une autre pile toute pareille, avec cette seule différence que le pôle positif communiquait au sol, tandis que le pôle négatif reste isolé, il est évident qu'il y aura partout du fluide résineux dont l'épaisseur ira croissant, depuis le 1^{er} cuivre (c'est-à-dire celui qui touche le sine communiquant au sol) où elle sera 1, jusqu'au 100^e cuivre où elle sera 100. Et si maintenant nous mettons ces deux piles bout à bout, en interposant seulement une rondelle humide entre les deux pôles qui communiquaient au sol, nous n'aurons qu'une seule pile de 200 couples, dont chaque moitié conservera l'équilibre électrique qu'elle avait d'abord: ainsi le milieu sera à l'état naturel, même après avoir supprimé les fils de communication; à partir de là on aura d'un côté de l'électricité vitrée, de l'autre de l'électricité résineuse; ces électricités ne pourront pas se rejoindre, et leurs épaisseurs, toujours croissantes par différences égales pour chaque couple, seront 100 à chaque pôle. Si l'on vient ensuite à troubler cet équilibre en prenant de l'électricité à l'un des pôles, le *zéro*, ou le point qui est à l'état naturel, se déplacera pour un instant; le pôle touché aura une épaisseur moindre que 100, et l'autre une épaisseur plus grande; mais bientôt, la perte par l'air diminuant plus rapidement l'épaisseur électrique du pôle le plus fort,

le zéro reviendra au milieu, et l'équilibre sera rétabli. Ainsi dans toute pile isolée l'arrangement définitif de l'électricité est tel que le milieu est à l'état naturel, tandis que les deux moitiés sont chargées de fluides contraires, l'épaisseur de ces fluides augmentant de 1, en passant d'un couple au suivant.

397. *De la pile en activité.* — Les pôles de la pile isolée étant des sources indéfinies d'électricités contraires, il est évident que, si l'on met chacun d'eux en communication avec un fil de métal, le fil partagera le fluide du pôle qu'il touche, et l'on aura ainsi deux conducteurs, l'un positif, l'autre négatif, qui étant mis en présence devront donner une recombinaison continue. C'est en effet ce que représente la figure 353; les deux fils (que l'on nomme aussi quelquefois les deux pôles de la pile) étant approchés à une petite distance, on voit jaillir une étincelle, une autre la suit de près, puis une autre, et ainsi de suite; c'est un courant de feu continu, c'est une batterie inépuisable qui se décharge toujours sans être jamais déchargée.

Lorsqu'on met les fils conducteurs au contact immédiat, et que l'on ferme ainsi le circuit de la pile, les étincelles disparaissent, mais tous les effets électriques ne sont pas détruits. Les fluides se développent encore dans tous les couples, entre tous les éléments, et ne cessent de venir se recomposer dans tous les points des fils conducteurs qui rejoignent les deux pôles de la pile. Ainsi au dehors tout paraît immobile, et en dedans tout est en activité et en mouvement. Une des preuves les plus frappantes de cette rapide circulation de l'électricité est le phénomène que présente un fil métallique un peu fin, que l'on interpose entre les conducteurs, pour fermer le circuit: si ce fil est un peu long, il devient chaud subitement; un peu plus court, il devient rouge, et plus court encore, il devient rouge blanc; alors, suivant la nature du métal, il entre en fusion et tombe en gouttes, brûle avec éclat, ou reste inaltérable, persistant dans cet état d'incandescence pendant tout le temps que la pile est en activité.

L'eau, les acides, les oxides, les sels et tous les corps, pour peu qu'ils soient conducteurs, éprouvent des effets remarquables lorsqu'en les place dans le courant de la pile, c'est-à-dire lorsqu'on les dispose entre les pôles, de manière qu'ils forment une partie du circuit, et que leur substance soit traversée par les fluides contraires, comme les fils métalliques des expériences précédentes. Mais avant d'étudier ces effets, il importe de prendre une idée de ce qui constitue la force de la pile.

398. *De la force de la pile.* — On peut distinguer dans une pile la force de production, la force de propagation et la force de tension.

1^o. La force de production est dépendante de la force électromotrice, c'est-à-dire de l'énergie avec laquelle les fluides sont séparés au contact des élé-

meus. Nous avons déjà dit que tous les métaux ne prennent pas en se touchant des charges ni des épaisseurs électriques égales; ainsi deux piles tout-à-fait pareilles, mais construites avec des métaux différents, pourront ne pas produire dans le même temps une même quantité de fluide. Il arrive heureusement que le zinc et le cuivre, qui se rencontrent partout et à bas prix, sont, entre tous les corps connus, ceux qui prennent les plus fortes charges électriques par leur contact. Par conséquent les piles construites avec ces métaux sont, toutes choses égales d'ailleurs, celles qui possèdent la plus grande force de production.

2°. La force de propagation de la pile ne dépend que de la nature et des dimensions du conducteur qui sépare les couples, car l'électricité ne peut arriver aux deux pôles pour parcourir le fil qui les joint, qu'après avoir traversé toutes les rondelles humides, ou en général tous les intervalles qui se trouvent entre les couples; si elle est retardée dans ce mouvement par l'imperfection du conducteur, la pile donne d'abord une décharge en vertu des tensions qu'elle possède à ses deux extrémités, mais après ce premier choc la propagation se ralentit; au contraire, si le conducteur est assez bon pour offrir un libre écoulement au fluide qui se développe sans cesse entre les éléments, la propagation est rapide et toujours égale. Dans tous les cas on peut considérer la longueur du circuit de la pile comme une espèce de canal, dans lequel les fluides électriques se meuvent avec plus ou moins de vitesse et de liberté, suivant que les conducteurs sont plus ou moins parfaits; la fil qui joint les pôles ne laisse passer dans un temps donné que la quantité de fluide qui a pu traverser la pile dans le même temps; d'où il résulte, par rapport aux dimensions du conducteur humide, que la force de propagation de la pile est en raison inverse de son épaisseur, et en raison directe de sa largeur: car nous verrons plus tard que la conductibilité des corps suit sensiblement ces deux lois remarquables.

L'eau est un mauvais conducteur; toute pile aurait une faible force de propagation, si elle était chargée ou amorcée avec de l'eau pure. Aussi emploie-t-on habituellement des dissolutions salées ou alcalines, et surtout des dissolutions acides; l'eau contenant environ 1/16 d'acide sulfurique et 1/20 d'acide nitrique, est le conducteur humide que l'on préfère; il est assez parfait pour donner passage aux fluides électriques, et en même temps il n'exerce pas une action chimique assez puissante pour corroder trop vite les éléments de la pile.

3°. La force de tension change avec la nature des éléments de la pile, mais elle est toujours proportionnelle à leur nombre, à moins que le conducteur ne soit assez mauvais. En effet, nous avons vu que sur le 2^e zinc la tension est double de ce qu'elle est sur le 1^{er}, qu'elle est triple sur le 3^e,

et ainsi de suite; or, si la force électromotrice qui s'exerce au contact du zinc et du cuivre, peut s'accumuler sur le zinc une tension d'électricité vitrée double de la tension qu'elle s'accumulerait sur un autre métal, sur du fer, par exemple, il est évident que pour la même nombre d'éléments la tension d'une pile de zinc et cuivre aurait toujours une tension double d'une pile de fer et cuivre. C'est ainsi que la tension change avec la nature des éléments. Mais elle ne dépend ni de leur grandeur, ni de l'étendue de la surface suivant laquelle ils se touchent; pour le démontrer il suffit de construire deux piles semblables; c'est-à-dire ayant le même nombre de couples, le même conducteur et les éléments de différentes grandeurs; ceux de la première étant, par exemple, de 1 centimètre carré, et ceux de la seconde de 1 décimètre. Alors, avec le plan d'épreuve, ou avec le condensateur à taffetas, l'on pourra reconnaître qu'elles ont exactement la même tension à leurs pôles, soit qu'on les observe pendant qu'elles sont isolées, soit qu'on les observe pendant que l'un de leurs pôles communique au sol. Enfin, si l'on construit deux piles qui ne diffèrent entre elles que parce que les éléments de l'une se touchent dans toute leur étendue, tandis que les éléments de l'autre se touchent par une surface très petite, on verra, par les mêmes moyens, qu'elles ont exactement la même tension. Ces conséquences ne se réaliseraient pas si les conducteurs étaient très mauvais.

300. *Diverses dispositions de la pile.* — La pile à colonne dont nous avons parlé jusqu'à présent, est assez commode pour la démonstration, mais elle offre de grands inconvénients dans la pratique. Les rondelles inférieures, comprimées par le poids des éléments supérieurs, se dessèchent promptement, et la liqueur qui s'en écoule, en ruisselant sur la surface de la pile, établit entre les couples des communications partielles qui diminuent d'autant l'effet total.

La pile à couronne est plus curieuse qu'utile, mais elle est si facile à faire qu'il est bon d'en indiquer la construction. Les éléments qui la composent sont de petites bandes ou même de petits fils de zinc et de cuivre, soudés bout à bout, ou seulement attachés par deux ou trois tours de torsion, et ensuite courbés en chevron. Des verres remplis d'eau acidulée étant disposés en rond ou en couronne, l'on met un chevron du premier au second, puis un autre du second au troisième, et ainsi de suite, avec la seule attention de les tourner dans le même sens. Si le premier verre contient l'extrémité cuivre du premier chevron, il formera le pôle négatif de la pile, tandis que le dernier verre contenant une extrémité zinc, en sera la pôle positif.

La pile à ouges a été long-temps en usage; elle est représentée dans la figure 355. Les éléments sont rectangulaires et soudés l'un sur l'autre, pour former un couple; tous les couples sont disposés

de charup et parallèlement, dans une cuisse en bois, π π' , dont les parois intérieures sont revêtues d'un mastie non conducteur; l'intervalle de deux couples forme une petite anse dans laquelle on met l'eau acidulée; c'est cette lame d'eau de deux ou trois lignes d'épaisseur qui remplace la rondelle humide de la pile à seltz: ainsi il faut avoir grand soin que les angles successifs n'aient entre elles aucune communication, ni par les bords, ni par la tranche supérieure des couples. En réunissant plusieurs piles semblables à celle qui est représentée dans la figure, on compose une batterie galvanique ou voltaïque. La réunion peut se faire de deux manières: les piles ayant, par exemple, cent couples de chacun un décimètre carré, si on en réunit deux, en faisant communiquer les deux pôles négatifs ensemble, et les pôles positifs ensemble, on aura une batterie de cent couples ayant chacun deux décimètres carrés; c'est la force de propagation qui sera doublée: au contraire, si on les réunit en faisant communiquer le pôle positif de la première avec le pôle négatif de la seconde, on aura une batterie de deux cents couples, ayant chacun 1 décimètre carré; c'est la force de tension qui sera doublée. Nous verrons plus tard que pour produire certains effets, ces batteries sont complètement différentes. La grande pile de l'École polytechnique était construite d'après ces principes; elle se composait de six cents paires de 1 pied carré. Celle de la Société Royale de Londres se composait de deux mille paires, les unes de six pouces et les autres de quatre pouces de côté.

La pile de Wollaston est représentée dans la figure 354; elle est maintenant la plus commode qu'on eonnaisse, et celle qui semble combinée d'après les meilleurs principes. Pour en mieux indiquer la construction, nous examinerons seulement deux couples représentés en section (Fig. 360) et de face (Fig. 359); e est le premier cuivre, z le premier zinc, v par son épaisseur; ils sont soudés en s ; e' s' est le deuxième cuivre, et z' s' le deuxième zinc; v et v' sont des vases remplis d'eau acidulée; l'électricité vitrée passe du premier zinc au deuxième cuivre par la couche d'eau qui les sépare; elle passe de même du deuxième zinc au troisième cuivre, et ainsi de suite. Cette disposition offre surtout deux grands avantages; premièrement, le fluide qui est sur le zinc peut en sortir par tous les points de la surface; secondement, il n'a qu'une couche liquide très mince à traverser pour se porter sur le cuivre, et cette couche, qui se trouve promptement altérée dans la pile à augé, peut ici se renouveler en se mélangeant au liquide du vase. Voilà pourquoi la pile de Wollaston a une force de propagation beaucoup plus grande que toutes les autres piles; car tout s'y trouve disposé de la manière la plus heureuse pour favoriser la conductibilité.

Un seul couple de cette espèce ayant seulement

quelques pouces carrés de surface, est capable de produire des phénomènes étonnans; il peut, par exemple, faire rougir un fil de platine. L'expérience en est représentée dans la figure 363; e est le enivre, z le zinc, l'enveloppe $e' e'$ ne sert qu'à favoriser la conductibilité; un petit fil de platine est tendu de r en r' , et quand on plonge ce cemple par le manche m dans un vase d'eau fortement acidulé, le fil de platine devient rouge à l'instant, par le seul effet du courant qui le traverse.

Avec une pile d'une douzaine de couples, disposée comme celle de la figure 354, on peut faire à peu près toutes les expériences galvaniques.

Cependant il y a de grands effets qui ne peuvent être produits que par des batteries beaucoup plus fortes, et je décrirai ici celle que je fis construire pour le Prince Royal il y a trois ans, lorsqu'il se livrait à l'étude des sciences avec ce vif intérêt et cette étonnante élévation d'esprit qu'il porte maintenant dans des affaires d'un autre ordre. Cet appareil fait partie du cabinet de physique et du laboratoire de chimie que le Roi a bien voulu me confier pour l'instruction de ses enfans, et où le duc de Nemours se prépare, avec autant de succès que son frère, à approfondir les hautes questions théoriques et les grandes applications industrielles de la physique et de la chimie.

La batterie galvanique du Palais-Royal est construite sur le principe de la pile de Wollaston; elle se compose de 160 éléments de chacun 7 pouces sur 5, et cependant elle n'occupe qu'un espace de 7 pieds sur 4, et elle peut être mise en jeu avec la plus grande facilité.

La figure 365 en représente une vue, et la figure 366 une coupe transversale. P et P' sont deux pieds en bois, portant chacun deux montans π , π' , et π' , π' ; quatre planchers p , q , r , s' (Fig. 366), garnis en plomb et munis de robinets, portent chacun quatre rangées de dix vases. Huit traverses t t' , quatre pour les montans π , π' et quatre pour les montans π , π' , portent chacune deux rangées de dix couples. On voit dans les montans π , π' , π , π' , les mortaises dans lesquelles les traverses peuvent monter et descendre, les chevilles c , qui les tiennent suspendues, et les entailles par lesquelles elles peuvent sortir lorsqu'en veut faire quelques réparations. Les grandes lames de cuivre, t , t , t , servent à établir la communication entre les couples des différentes traverses; il est visible que l'on peut n'employer que vingt couples à la fois. Pour charger la pile, on emploie des entonneurs à robinet π (Fig. 367), qui tiennent la mesure d'un vase. Une grande cage en bois, qui se meut sur des roulettes, et qui a une porte à chaque bout, peut recouvrir tout l'appareil et laisser seulement sortir les fils conducteurs de chaque pôle.

La pile en hélice est une modification de la pile

de Wellaston; elle est surtout destinée à produire de grandes quantités d'électricité sans donner de grandes tensions. Les figures 368, 369 et 370, représentent les dispositions que j'ai adoptées pour la pile de la Faculté des Sciences. Sur un cylindre en bois *b* (Fig. 370), de trois pouces de diamètre et d'un pied de long, on enroule deux lames, l'une en zinc et l'autre en cuivre, qui sont séparées par des bouts de lièbre en drap *l*, joints par de petites ficelles, dont l'épaisseur est un peu moindre que celle de la lièbre. On forme ainsi des couples dont les deux éléments ont chacun cinquante ou soixante pieds de surface; ces couples sont ajustés dans de fortes barres en fer, *r r'* (Fig. 368), au moyen des tiges de fer *rr'*, et des écrous *rr*, etc. Dans cette disposition les couples restent fixes; c'est le planeur *r* et les seaux en bois *a, a, ...*, contenant l'eau acidulée, qui montent et qui descendent au moyen des cordes *c d r*, *c' d' r'*, du treuil *rr'* de la roue dentée *a*, et de la manivelle *rr*. Les communications sont établies entre les divers couples par de larges lames en cuivre *l, l*, qui peuvent facilement se dessouder lorsqu'il est nécessaire de démonter l'appareil pour le transporter. La première de ces lames est soudée au zinc du premier couple et au cuivre du deuxième; la deuxième est soudée au zinc du deuxième couple et au cuivre du troisième, etc. C'est entre ces lames et le zinc que s'exerce la force électromotrice, et non pas entre le zinc et les grandes feuilles de cuivre qui en sont séparées par les lièbres. La batterie de douze couples, représentée dans la figure 369, est capable de produire de grands effets, et l'usage m'a démontré que cette disposition n'est pas sans avantage.

400. *Effets physiologiques de la pile.* — Avec les données précédentes nous pouvons étudier les divers effets de la pile, en distinguant les *effets physiologiques*, les *effets physiques* et les *effets chimiques*.

Les commotions que produit l'électricité de la pile ne sent ni moins vives ni moins redoutables que celles des batteries ordinaires. Leur intensité dépend surtout du nombre des paires, et par conséquent de la force de tension : la forte pile en hélice de la Faculté des Sciences, composée de douze paires de cinquante pieds de surface, ne donne que de très faibles commotions, tandis qu'une petite pile de quarante ou cinquante couples d'un pouce de diamètre, donnerait des commotions assez vives pour se faire sentir jusque dans la poitrine. L'épiderme est un mauvais conducteur, et l'on peut, avec les mains sèches, établir la communication entre les pôles d'une pile de vingt ou trente paires, sans éprouver la moindre secousse, mais avec les mains mouillées, ou seulement humides, on reçoit le choc instantanément; le courant qui s'établit alors dans les membres continue de les agiter aussi long-temps que dure le contact. Pour faire l'expérience sans danger, l'on peut, d'une

main, toucher l'un des pôles, et de l'autre main toucher successivement des couples de plus en plus éloignés; si, par exemple, on touche le dixième ou le vingtième, on ne reçoit la commotion que des dix ou vingt couples compris entre les deux mains : de la sorte, chacun peut graduer la vigueur du choc, et le proportionner à sa constitution; car le même courant, qui produirait une rude secousse sur une personne, pourrait, sur une autre, n'exciter qu'un petit frémissement, ou quelques picotements à l'extrémité des doigts. En présence d'une grande pile d'une centaine de couples, il n'est pas nécessaire d'établir la communication entre les deux pôles pour être ébranlé par une forte secousse : les électricités accumulées sur chaque moitié de la pile ont une grande tension, et dès qu'elles trouvent un corps conducteur, elles s'y précipitent avec violence; mais alors la secousse n'est pas durable. On serait sans doute renversé et peut-être gravement blessé, en faisant passer par les bras et la poitrine le courant d'une pile de quelques centaines de paires, fortement chargée.

Dans les premiers temps du galvanisme, on a fait de nombreuses expériences sur les effets thérapeutiques des courans de la pile; on a essayé surtout de guérir les névralgies, la goutte, les rhumatismes, les paralysies, etc. On dirigeait les courans comme les décharges électriques, au moyen d'armatures métalliques disposées de part et d'autre des organes affectés, et l'on augmentait peu à peu le nombre des paires de la pile, pour rendre les commotions plus vives et plus efficaces. On a obtenu quelques effets, ou a même annoncé des cures merveilleuses; mais en discutant toutes les observations, il paraît, en dernier résultat, que le courant électrique est au moins un remède excessivement capricieux, qui stimule ou qui distrait pendant quelques instans, et qui produit rarement des effets durables; s'il y a en lui une chose constante, c'est la douleur qu'il cause au malade; cette douleur, à la vérité, est très supportable, et, peut-être, quand elle se fait sentir dans un membre paralysé on peut la prendre pour un commencement de guérison.

Dans les corps récemment privés de la vie, un courant énergique excite encore des commotions et des mouvemens extraordinaires : on dirait que toute l'organisation s'agite et fait d'incroyables efforts pour se ranimer; mais ces violentes convulsions cessent avec le courant, et tout retombe dans l'inertie de la mort.

Cependant, dans une série d'expériences que nous avons faites avec MM. Magendie, Andral et Reulien, sur l'irritabilité produite par les courans électriques, nous avons reconnu que des animaux asphyxiés sont promptement rappelés à la vie lorsqu'on les met entre les deux pôles de la pile. Nous avons plusieurs fois ranimé des lapins et des cochons d'Inde qui étaient asphyxiés depuis plus d'une demi-heure.

Nous avons reconnu pareillement que le courant excite des mouvements péristaltiques très remarquables dans plusieurs vaisseaux.

Enfin des expériences faites avec soin, tant en France qu'en Angleterre, semblent indiquer que les fonctions digestives, complètement suspendues par la section des nerfs qui se rendent à l'estomac, se trouvent rétablies par un courant électrique, et s'accomplissent régulièrement sous son influence.

La commotion est sans doute le plus simple de ces phénomènes physiologiques; elle est produite par l'électricité ordinaire, comme par l'électricité de la pile, et cependant on ne sait rien jusqu'à présent sur sa véritable cause. Quelles sont les substances organiques que le fluide affecte de préférence? quelles sont les modifications qu'il imprime, ou à leurs molécules individuelles, ou au système qu'elles composent? c'est sans doute ce que des expériences ultérieures feront connaître. Il y a beaucoup plus à espérer des recherches qui seront dirigées vers ce but, que de celles que l'on pourra tenter encore pour découvrir des moyens curatifs. Les substances inorganiques sont, comme nous allons le voir, échauffées par le courant, ou décomposées chimiquement; et il est probable que dans les corps vivants ce n'est ni l'un ni l'autre de ces effets qui produit la commotion; il serait curieux d'examiner si les parties contractiles des plantes sont mises en mouvement par le courant, et si elles possèdent à un degré plus ou moins marqué la sensibilité électrique des corps vivants. Ce qui constitue cette sensibilité, les fibres ou les tissus qui en jouissent, et les modifications qu'ils éprouvent, voilà ce qu'il faut chercher.

Nous ajouterons ici qu'il paraît résulter de quelques expériences de Volta, de M. Lehot, du docteur Bellingieri, et surtout de M. Marianini, que, quand le courant électrique se propage dans les vers, *dans le sens de leurs ramifications*, il produit une contraction musculaire au moment où il pénètre, et une sensation au moment où il cesse, et qu'au contraire quand il s'y propage *en sens inverse* de leurs ramifications, il produit une sensation tant qu'il subsiste, et une contraction au moment où il cesse (*Ann. de phys. et de chim.*, t. 40, pag. 225).

401. *Effets physiques de la pile.* — Les courants peuvent produire, comme les décharges des batteries ordinaires, de la chaleur, de la lumière et du magnétisme; ce dernier effet, et l'action mutuelle que les courants exercent les uns sur les autres, constituent l'électro-magnétisme, que nous devons étudier dans le livre suivant.

Lorsqu'un fil métallique assez fin et assez court établit une communication directe entre les pôles de la pile, il s'échauffe, devient rouge, rouge-blanc, et souvent même il se fond et se volatilise.

Les douze couples de la figure 309 peuvent, en quelques secondes, porter au rouge-blanc un fil de

platine de 1 mètre de long sur un millimètre d'épaisseur, et le maintenir dans cet état pendant tout le temps que la pile est en activité. Un fil plus mince ou plus court se fond et tombe en globules.

Le fer et l'acier sont liquéfiés encore avec plus de facilité; alors ils brûlent avec un éclat éblouissant.

Les minces feuilles d'or sont volatilisées, et comme on ne peut en toucher un point sans le réduire en vapeur, il s'établit de nombreuses solutions de continuité entre lesquelles on voit briller une foule de petits éclairs d'une couleur verte très vive.

Les feuilles d'argent présentent à peu près les mêmes phénomènes.

Les feuilles d'étain brûlent avec moins d'éclat; elles tombent en petits globules rouges, qui donnent naissance à des houppes soyeuses flottantes, semblables à des flocons de toile d'araignée.

Le platine en éponge, et tous les métaux en feuilles minces ou en limailles offrent quelques particularités curieuses, dépendantes de leur nature, de leur fusibilité et de leur affinité pour l'oxygène.

Pour qu'il se développe une grande chaleur, il n'est nullement nécessaire que la pile ait une grande tension; un seul couple de cinquante ou cent pieds de surface, ne donnant pas la moindre commotion perceptible, est capable de mettre en fusion des fils de fer, ou même des fils de platine assez longs; ainsi les quantités de chaleur paraissent dépendre des quantités de fluide qui passent, plutôt que de la tension avec laquelle ils sont lancés. Cependant on ne sait pas, d'une manière certaine, si un seul couple de cent pieds carrés de surface donnerait autant de chaleur que cent couples de un pied carré, en supposant que le liquide conducteur fût le même dans les deux cas, et que la distance du zinc au cuivre qui l'enveloppe fût aussi la même.

Quand le fil de métal est en communication permanente avec l'un des pôles, et qu'on l'approche de l'autre pôle à une très petite distance, il se présente plusieurs phénomènes remarquables. Le courant d'étincelles produit une lumière éblouissante, le point vis-à-vis lequel se trouve l'extrémité du fil est rapidement échauffé; si c'est du mercure, il se vaporise avec grand bruit; si c'est du cuivre, il brûle avec une flamme verte et pourpre extrêmement vive; si c'est du platine, il entre en fusion; tout cela se conçoit, puisque le fluide, qui se propage librement dans l'étendue du conducteur, est obligé de se resserrer et de s'accumuler pour sortir par le seul point qui est en présence du fil; mais ce qui me semble tout-à-fait remarquable, c'est que l'extrémité du fil se liquéfie elle-même, qu'elle forme un globule volumineux tout incandescent, tandis que le reste du fil est à peine échauffé. D'où vient cette grande chaleur en un seul point, lorsqu'il est évident que toutes les sections du fil cylindrique donnent passage au même instant à la

même quantité de fluide qui sort à son extrémité ? Il me semble nécessaire d'admettre qu'en traversant les surfaces, le fluide électrique produit plus de chaleur qu'en traversant, dans une masse homogène, une section d'égale étendue.

Aussitôt que les communications sont bien établies, le fil prend sensiblement la même chaleur dans toutes ses parties ; mais les différents métaux présentent, sous ce rapport, de grandes différences. M. Children en a fait la comparaison d'une manière ingénieuse et commode, au moyen d'un grand appareil à la Wollaston de vingt-un couples, dans lesquels le zinc offrait trente-deux pieds de surface (*Trans. philosoph.*, 1815). Après avoir préparé, avec toutes les substances, des fils de même diamètre et de même longueur, il essayait chacun d'eux avec tous les autres ; par exemple, l'or avec le cuivre, le zinc, le platine, etc.

L'or étant en communication avec l'un des pôles, le fer en communication avec l'autre, on approchait jusqu'à un contact les extrémités libres de ces deux fils ; le fer entra en vive ignition, l'or n'éprouvait pas de changement sensible. Tous les fils avaient huit pouces de long et environ un tiers de ligne d'épaisseur.

Or et platine ; le platine devient rouge-blanc, l'or ne change pas.

Or et argent ; l'or entre en ignition et non l'argent.

Or et cuivre ; l'un et l'autre en ignition.

Platine et fer ; le platine est rouge-blanc, le fer rouille.

Platine et zinc ; le platine est rouge-blanc, le zinc ne change pas.

Fer et zinc ; le fer coule, le zinc ne fond pas.

Zinc et argent ; le zinc entre en ignition et coule, l'argent ne change pas.

En chargeant sa batterie avec de l'eau plus acidulée, M. Children obtint des effets de chaleur d'une intensité prodigieuse.

Un fil de platine de 5 pieds 6 pouces de long, et de 11/100 de ponce d'épaisseur devint rouge-blanc.

Une tige carrée de platine de 2 lignes de côté, et de 2 pouces 3 lignes de longueur, entra en fusion.

Divers oxides terreux furent fondus et en partie réduits.

Après avoir scié un fil de fer dans la moitié de son épaisseur, et rempli la fente avec de la poussière de diamant, le diamant fut liquéfié et le fer qui le touchait transformé en acier.

Lo D. Robert Hare, avec un appareil de quatre-vingts couples en hélice qu'on appelle *deflagrator*, a obtenu des effets de chaleur encore plus étonnans ; d'après qu'il a pu fondre du charbon et de la plombagine.

Une des expériences les plus curieuses sur ces effets de lumière et de chaleur, est celle que l'on doit à sir H. Davy, et dont nous aurons occasion de

parler encore dans l'électro-magnétisme. Elle peut se disposer de la manière suivante : dans une grande cloche ou dans un hallon de 10 à 12 pouces de diamètre, ou adapte deux boîtes à cuir, opposées l'une à l'autre, par lesquelles on fait passer deux fortes tiges qui peuvent s'approcher jusqu'au contact, ou s'éloigner à volonté. A l'extrémité de chaque tige on attache un petit cône de charbon fortement calciné et étieut dans le mercure ; il est nécessaire que le charbon touche le métal par une grande surface. Alors on fait le vide dans l'appareil, on avance les tiges de manière que les pointes des cônes se trouvent à une petite distance, et l'on établit la communication entre les deux pôles d'une forte pile ; bientôt le courant franchit l'espace qui sépare les charbons, échauffe leurs pointes et les rend éblouissantes de lumière ; rien n'est comparable à l'éclat qu'elles prennent. Dès cet instant, l'on peut écarter les tiges graduellement, le courant ne cesse pas de traverser le vide qui les sépare, et, de cette manière, on produit un faisceau étincelant qui remplit tout l'appareil. Le phénomène ne se montre pas avec moins d'éclat dans de l'air raréfié à quelques centimètres de pression, mais alors le charbon se consume en partie. Nous verrons plus tard qu'il y a une analogie remarquable entre cette vive lumière et celle des anores boréales.

402. *Effets chimiques de la pile.* — Le premier et le plus remarquable des effets chimiques de la pile fut découvert au commencement de ce siècle (le 30 avril 1800), par MM. Carlisle et Nicholson. Ces deux physiciens, pour répéter les expériences de Volta, avaient construit à la hâte une pile à colonne, avec des pièces de monnaie, des plaques de zinc et des rondelles de carton. Après quelques essais, l'odeur particulière de l'hydrogène s'étant fait sentir, Nicholson eut l'heureuse idée de faire passer le courant dans un tube plein d'eau, par le moyen de deux fils de métal qui s'approchaient à une petite distance. Bientôt l'hydrogène parut en petites bulles, tout autour du *fil négatif*, et le *fil positif* s'oxidait visiblement. Ainsi les deux éléments de l'eau furent enfin séparés ; car Cavendish avait bien pu composer de l'eau avec de l'oxygène et de l'hydrogène, mais, jusque là, tous les efforts avaient été impuissans pour la décomposer.

L'appareil qui nous sert maintenant pour la séparation des éléments de l'eau est représenté dans la figure 361 ; il se compose d'un verre à pied dont le fond est traversé par deux fils de platine *f*, *f'* qui ne doivent pas se toucher ; les cloches *a* et *b*, renversées et pleines de liquide, couvrent chacun des fils. Aussitôt qu'on établit la communication avec les pôles de la pile, les bulles de gaz se dégagent en abondance ; l'oxygène pur monte toujours dans la cloche qui couvre le fil positif, et l'hydrogène pur toujours dans celle qui couvre le fil négatif. Il est évident que les deux cloches doivent communiquer entre elles par le liquide intermédiaire, car le courant ne peut pas traverser le verre.

L'eau distillée et parfaitement pure se décompose lentement; mais dès qu'on y met une goutte d'un acide quelconque, ou quelques atomes de sel, ou quelques parcelles d'une substance qui augmente sa conductibilité, les bulles de gaz se dégagent vivement, et il ne faut que deux ou trois minutes pour voir 1 centimètre cube d'oxygène dans la cloche positive, et 2 centimètres cubes d'hydrogène dans la cloche négative.

Deux atomes d'hydrogène à l'un des pôles et un atome d'oxygène à l'autre, voilà un phénomène bien surprenant et qui a long-temps exercé la sagacité des physiciens; car, dans les décompositions ordinaires, les élémens se désunissent et ne s'éloignent pas l'un de l'autre, tandis qu'ici il y a tout à la fois séparation et transport des élémens séparés. On a fait des tentatives sans nombre pour saisir la molécule d'eau qui se décompose, ou pour errer en chemin les atomes gazeux avant qu'ils fussent arrivés aux fils de métal, d'où l'électricité passe dans le liquide; mais rien n'a réussi. Par exemple, quand on met de l'eau dans deux vases, que l'on fait plonger le fil positif dans l'un, le fil négatif dans l'autre, et qu'ensuite on établit la communication entre les vases par un corps conducteur pour que la circulation électrique puisse s'établir, on observe des phénomènes singuliers: si le conducteur intermédiaire est un métal, l'eau est encore décomposée, comme à l'ordinaire, mais dans chaque vase séparément; s'il est un corps humide, quelquefois encore il la décompose comme un métal, mais le plus souvent la décomposition se fait on ne sait où; l'oxygène paraît seul dans l'un des vases, dans le positif, et l'hydrogène seul dans l'autre; c'est ce qui arrive, par exemple, quand on établit la communication en plongeant un doigt dans chaque vase. Alors on semble en droit de conclure que l'un des élémens gazeux a dû traverser le corps pour se rendre au pôle où il se dégage. De même, quand on établit la communication avec un morceau de glace, il semble nécessaire que l'un ou l'autre des gaz passe au travers de la glace, puisque chacun d'eux ne se dégage qu'à l'un des fils métalliques.

M. Grotthuss a donné, de ces phénomènes et de toutes les autres décompositions chimiques qui produisent le courant, une explication qui a été admise par tous les physiciens, non-seulement parce qu'elle est ingénieuse, mais parce qu'elle semble tout-à-fait conforme à la vérité. Concevons une file de molécules d'eau, 1, 2, 3, 4, etc. (Fig. 382), formant une espèce de chaîne droite, ou courbe qui joint le fil positif *f* au fil négatif *f'*; l'électricité positive de *f* agira par influence sur la molécule 1 et la tournera pour attirer l'oxygène qui est électro-négatif (382) et pour repousser l'hydrogène qui est électro-positif; la molécule 1 agira de même sur la molécule 2, et ainsi de suite; à l'autre extrémité de la chaîne la même disposition se produira; et dès que la tension électrique sera assez forte, l'oxy-

gène de la molécule 1, entraîné par l'attraction, sera comme arraché des molécules d'hydrogène auxquelles il est uni et s'en viendra au pôle; tandis que l'hydrogène, devenu libre, se portera sur l'oxygène de la molécule 2 pour se combiner avec lui, donnent la liberté à l'hydrogène de cette molécule, qui s'en ira à son tour prendre l'oxygène de la molécule 3, et ainsi de suite. A l'autre pôle, des phénomènes analogues se produisant en sens inverse, et il y aura ainsi au même instant une foule de décompositions et de recompositions successives. Ce qui se passe dans une file de molécules, se passe dans toutes les files qui joignent les deux pôles, et de là, la multitude des atomes gazeux devenus libres, et l'abondance des bulles distinctes qui se forment et qui se dégagent.

Ces mouvemens vibratoires des derniers élémens de la matière peuvent s'accomplir au milieu des masses solides comme au milieu des masses fluides; et certainement, si, comme tout semble l'indiquer, l'explication de M. Grotthuss est vraie pour la décomposition des liquides, elle ne peut manquer de l'être pour celle des solides et de tous les autres corps sur lesquels le courant électrique peut avoir quelque prise.

Les oxides sont réduits par la pile, et décomposés comme l'eau; l'oxygène paraît au pôle positif, et le métal ou la base au pôle négatif. Pour ceux qui sont facilement réductibles, pour l'oxide d'argent, par exemple, on peut disposer l'expérience de la manière suivante: Sur une lame de platine communiquant au pôle positif, on met de l'oxide sec en poudre, que l'on vient toucher ensuite avec le fil négatif; soit que le contact soit permanent, soit qu'il soit accidentel et renouvelé par intervalle, on voit bientôt paraître une petite loupe d'argent à l'extrémité du fil; dans le second cas, le poussière de l'oxide est traversée par de vives étincelles d'une belle couleur verte. Les oxides moins réductibles doivent être légèrement baignés d'eau, surtout lorsqu'ils sont en poudre. A la vérité, cette eau se décompose en partie; mais elle favorise la conductibilité, et après un certain temps on aperçoit, suivent la feroce de la pile, de petits globules ou de petites parcelles de métal autour du fil négatif.

Pendant long-temps on avait supposé que les alcalis, tels que la soude et la potasse, étaient des corps tout-à-fait indécomposables; mais, en 1807, au moyen d'une puissante batterie, sir H. Davy put en séparer les élémens. Cette découverte fut une grande époque pour la science. Les alcalis et les terres furent ramenés dans la classe ordinaire des oxides, et la chimie eut à sa disposition deux corps métalliques nouveaux, le sodium et le potassium, qui sont deux des agens les plus énergiques qu'elle possède. Lorsqu'on tente la décomposition de la potasse par les méthodes que nous venons d'indiquer pour les autres oxides, l'on aperçoit bientôt que des globules nombreux paraissent au pôle né-

gatif et s'enflamme dans l'air en produisant des jets de lumière. C'est le potassium qui résulte de la décomposition de la potasse; son affinité pour l'oxygène est si grande qu'il brûle dans l'eau avec plus d'éclat encore que dans l'air : aussi ne peut-on le conserver que dans l'huile rectifiée de naphtho ou de pétrole, dont les éléments constitutifs sont l'hydrogène et le carbone. Le D. Seebeck a donné le moyen de recueillir plus sûrement le potassium au pôle de la pile; il a imaginé de former une petite capsule avec le fragment de potasse caustique que l'on veut décomposer; cette capsule est remplie de mercure et posée sur une lame de platine communiquant au pôle positif de la pile : alors, en touchant le mercure avec le pôle négatif, la décomposition s'opère. L'oxygène se porte sur le platino, et se dégage, tandis que le potassium arrive dans le mercure et forme avec lui un amalgame assez persistant. Par la distillation dans la vapeur du pétrole, l'on sépare ensuite le mercure, et l'on obtient le potassium à l'état de pureté.

La chaux, la baryte, la strontiane et la magnésie, traitées de la même manière, soit seules, soit mélangées avec la soude ou la potasse, ont donné des preuves non douteuses de leur décomposition; seulement les métaux qui en résultent, le calcium, le baryum et le strontium, sont bien moins faciles à séparer du mercure, à cause de l'action très vive qu'ils exercent, dit-on, sur le verre et sur tous les corps oxygénés pour enlever leur oxygène et repasser à l'état d'oxyde.

La silice, l'alumine, la zircone et la glucine, sont beaucoup plus difficiles à réduire; et, si l'on doit à présent, d'après les expériences décisives de Wöhler, les regarder comme des oxydes à bases métalliques, on peut cependant conserver quelques doutes sur les expériences dans lesquelles on avait cru voir des traces de ces métaux au pôle négatif des fortes batteries.

Les acides se décomposent comme les oxydes, et leur oxygène persiste encore à se rendre au pôle positif, tandis que la base vient au pôle négatif.

Enfin, tous les sels sont aussi décomposés par la pile; mais ils présentent des phénomènes plus variés.

1°. Quand l'acide et la base sont difficilement décomposables, ces deux éléments sont simplement séparés, et l'acide, comme participant davantage des propriétés de l'oxygène, se rend toujours au pôle positif, tandis que la base vient au pôle négatif;

2°. Quand l'acide est facilement décomposable, non-seulement il est séparé de l'oxyde, mais il est lui-même décomposé, on au moins desoxygéné; et l'oxygène qu'il perd vient au pôle positif, tandis que le radical s'en va avec l'oxyde au pôle négatif;

3°. Quand l'oxyde est facilement décomposable, il est lui-même réduit; son métal pur vient au pôle négatif, tandis que l'oxygène se rend au pôle positif, où il se combine avec l'acide, quand celui-ci

est capable de recevoir un nouveau degré d'oxygénation;

4°. Si l'acide et l'oxyde peuvent l'un et l'autre perdre aisément leur oxygène, la décomposition est complète, tout l'oxygène vient au pôle positif, et le métal de l'oxyde se rend au pôle négatif avec le radical de l'acide.

Ces divers phénomènes peuvent se produire avec des sels simplement humectés, ou avec des dissolutions salines plus ou moins étendues; dans ce dernier cas, surtout, l'eau est abondamment décomposée.

Pour un sel dont l'acide n'est pas l'acide fluorique et dont la base n'est pas l'un des terres ou l'un des alcalis qui se décomposent difficilement, l'on peut à volonté obtenir la simple séparation de l'acide et de l'oxyde, ou la réduction de l'un et l'autre. Il suffit pour cela d'employer une pile très faible ou une pile très puissante; et comme on peut affaiblir une pile en forçant le courant à traverser un grand espace mauvais conducteur, on voit que la seule distance des fils pourra déterminer l'un ou l'autre des phénomènes. Pour une petite distance entre le fil positif et le négatif, le courant ayant toute son énergie, l'acide sera décomposé et l'oxyde réduit; pour une distance un peu plus grande, l'acide, par exemple, ne sera pas décomposé, et, pour une distance plus grande encore, l'oxyde lui-même cessera d'être réduit; il n'y aura plus qu'une simple séparation des éléments du sel.

Les couleurs végétales qui changent par l'action des acides et des oxydes sont très propres à montrer aux yeux cette puissance décomposante de la pile. Si l'on prend, par exemple, dans un tube courbé en forme de V, une dissolution de teinture de tourne-sol, de chou rouge ou de petits radis violets, et qu'on y fasse passer le courant au moyen de deux fils de platine dont les extrémités sont à quelques lignes de distance, on aperçoit, après quelques instans, une belle couleur rouge de vin paillet dans la branche positive, et une couleur verte dans la négative. Le sel qui constitue la couleur végétale est donc décomposé; son oxyde, on se portant au pôle négatif, fait tourner au vert tout le liquide voisin, et son acide, au contraire, fait passer au rouge le liquide qui touche le fil positif. En établissant la communication en sens inverse, on voit les couleurs produites disparaître peu à peu; pendant un instant les deux branches reprennent l'état naturel; et un moment après elles se colorent en sens contraire.

Sir H. Davy a profité des circonstances remarquables qui accompagnent la décomposition des sels, pour étudier plus particulièrement le phénomène si étendant du transport. Nous regrettons de ne pouvoir donner ici qu'un extrait fort abrégé de ses importantes recherches.

1°. Un vase contenant une dissolution saline et un autre vase contenant de l'eau distillée, communiquant entre eux par des filaments humides

d'amiante. Le fil positif de la pile plonge dans le premier, le fil négatif dans le second, et la décomposition s'opère; si l'oxide n'est pas réduit, il chemine sur l'amiante, traverse l'eau, et vient se rendre au pôle négatif; s'il est réduit, c'est le métal qui parcourt ce trajet. Par exemple, avec le nitrate d'argent, tous les filaments soyeux de l'amiante se couvrent d'une multitude de petites parcelles d'argent revivifié. En établissant la communication en sens inverse, c'est l'acide qui parcourt l'amiante pour venir aciduler l'eau qui se trouve alors au pôle positif;

2°. La dissolution saline étant placée entre deux vases d'eau pure et communiquant avec chacun d'eux par de l'amiante, il y a encore décomposition et transport dès que les deux fils de la pile plongent, l'un dans le premier vase d'eau, et l'autre dans le second. L'acide est encore transporté au pôle positif et l'oxide au pôle négatif;

3°. Trois vases sont disposés comme dans l'expérience précédente: le premier contient de l'eau pure, le troisième une dissolution saline, et celui du milieu une teinture végétale, de tournesol ou de sirop de violette. Le sel est encore décomposé par le courant, et dans la vase d'eau pure on trouve l'acide ou l'oxide, suivant qu'on établit la communication dans un sens ou dans l'autre. Mais, et c'est un phénomène bien digne de remarque, dans aucun cas la teinture végétale n'éprouve d'altération; elle n'est ni rougie par l'acide, ni verdie par l'oxide; et cependant elle est à coup sûr traversée par l'un ou l'autre. Ainsi les éléments chimiques semblent perdre toute leur force d'affinité pendant qu'ils se trouvent sous l'action du courant électrique qui les emporte;

4°. Lorsqu'à la teinture végétale on substitue quelque dissolution alcaline très concentrée et très puissante, il y a des acides qui ne peuvent pas la traverser; ils sont arrêtés au passage; et, dans ces circonstances seulement, c'est la dissolution elle-même qui devient le pôle de la pile; le vase d'eau pure est encore traversé par l'électricité, mais l'acide ne peut arriver jusqu'à lui.

5°. Lorsqu'à la teinture végétale on substitue quelque acide très puissant et concentré, il y a aussi des oxides qui ne peuvent le traverser; ils se combinent avec lui sans pouvoir se rendre au pôle qui les attire.

Ces deux derniers phénomènes sont une preuve que les affinités chimiques, toujours modifiées par le courant, ne sont pas toujours détruites par lui, et qu'il y a des cas où elles conservent encore assez d'énergie pour s'exercer malgré son influence. Peut-être un courant plus fort serait-il capable de neutraliser les actions chimiques qui s'exercent encore sous un courant plus faible.

Les divers oxides qui entrent dans la composition du verre peuvent eux-mêmes être réduits ou séparés par l'action de la pile. Les substances végétales et animales peuvent pareillement être décomposées

lorsqu'elles sont humides. Ces phénomènes, auxquels on était loin de s'attendre quand on ne connaissait pas encore toute la puissance de l'appareil de Volta, répandaient une grande confusion dans les premières expériences. Par exemple, l'eau la plus pure devenait tantôt acide, tantôt alcaline, sous l'influence du courant. Quelques expérimentateurs y trouvaient alors de l'acide nitrique et de l'ammoniaque; d'autres de l'acide hydro-chlorique; d'autres enfin un acide qu'ils proposaient d'appeler acide électrique, supposant qu'il était formé de toutes pièces par une combinaison véritablement chimique du fluide électrique et de l'eau.

Sir H. Davy explique le premier l'origine de toutes ces substances, démontrant qu'elles provenaient du verre ou des membranes végétales ou animales que l'on employait dans les expériences; il fit connaître en même temps le phénomène du transport dans ses détails, et jeta les premiers fondemens de la science électro-chimique (*Trans. phil.*, 1807, et *Ann. de Chimie*, t. 63). C'est ainsi qu'il débuta dans cette immense carrière, où il devait faire de si belles découvertes et mériter une si grande renommée.

On doit au D. Seebeck la connaissance d'un phénomène très singulier qui se produit aussi par l'action de la pile (*Ann. de Chimie*, mai 1808). MM. Berzélius et Pontin (*Bibliothèque britannique*, juin 1809), sir H. Davy (*Ann. de Chimie*, août 1810), et MM. Gay-Lussac et Thénard (*Recherches physiques-chimiques*, 1^{er} vol.) ont fait des recherches sur ce phénomène, qui a été l'objet d'une assez longue controverse. Voici les circonstances dans lesquelles il se produit: l'on met quelques grammes de mercure dans une capsule d'hydrochlorate d'ammoniaque (*Fig.* 356); on la pose sur une lame métallique communiquant au pôle positif d'une forte pile, et dès qu'on touche le mercure avec le fil négatif, le courant s'établit, le volume de mercure augmente à vue d'œil; il croît comme un champignon, prend de la consistance, et devient jusqu'à cinq ou six fois plus grand que le volume primitif. Si l'on supprime les communications, ce champignon décroît peu à peu, et le mercure reprend son état liquide; l'amalgame qui s'était formé ne subsiste que sous l'influence du courant.

L'ammoniaque concentrée et la plupart des sels ammoniacaux donnent le même résultat que l'hydrochlorate d'ammoniaque. L'amalgame ainsi formé a les propriétés suivantes: Sa pesanteur spécifique est comprise entre 2 et 3; à la température de 25° centigrades il a la consistance d'une pâte un peu ferme; à 0 il se consolide et cristallise, ce qui est une preuve que les éléments qui le constituent ne forment pas un mélange accidentel, mais une véritable combinaison; les cristaux qu'il donne alors sont cubiques, et paraissent souvent aussi gros et aussi réguliers que ceux de bismuth. D'après MM. Gay-Lussac et Thénard, un volume de mercure, pour prendre cet état, absorbe un volume d'hydrogène, représenté par 3,47, et un volume

d'ammoniaque représenté par 4,22. Dès que cet amalgame est abandonné à lui-même, l'hydrogène et l'ammoniaque se dégagent en totalité, et, s'il y a lieu, se combinent avec les corps qu'ils rencontrent.

Sir H. Davy a formé un composé analogue sans influence électrique, en mettant du mercure chargé de potassium en contact avec du sel ammoniac légèrement humide. Cet amalgame est plus persistant que le premier. La présence du potassium semble en contenir les éléments volatils; mais que ce métal repasse à l'état d'oxide en seulement qu'il s'étende dans une trop grande masse de mercure, à l'instant la décomposition s'opère, l'hydrogène et l'ammoniaque se dégagent, et les volumes de ces gaz que l'on peut recueillir sont à peu près les mêmes que dans l'amalgame électrique; il paraît cependant que le volume d'hydrogène restant 3,47, celui d'ammoniaque peut être quelquefois de 8,67. Telle est du moins l'opinion de MM. Gay-Lussac et Thenard, qui nous semble fondée sur des expériences tout-à-fait concluantes.

403. *Effets chimiques et mécaniques de la pile.*— Un vase en verre étant séparé en deux compartiments par une cloison verticale faite avec une membrane de vessie, ou avec une feuille de papier enduite d'albumine coagulée par la chaleur, on peut opérer la décomposition d'une dissolution quelconque, comme si la cloison n'existait pas; car la membrane, en s'imbibant, établit une communication suffisante entre les liquides des deux compartiments, dans chacun desquels plonge l'un des fils de la pile. Mais, pendant que le phénomène chimique s'accomplit, il se manifeste aussi un phénomène mécanique remarquable: le liquide passe au travers de la membrane, comme poussé par une force qui l'entraîne du côté positif au côté négatif, et dans peu de temps on observe une différence de niveau très sensible. La nature de la dissolution paraît être sans influence sur le résultat; c'est toujours dans le compartiment négatif que le niveau s'élève. Cette expérience curieuse est due à M. Perrett (*Annals of Philos.*, juillet 1816, et *Ann. de Chimie*, t. II, 1816).

Pour disposer l'appareil d'une manière plus commode, on peut prendre un large tube fermé par un bout avec une membrane et plongé verticalement dans un vase ouvert. Alors le niveau du liquide étant le même dans le tube et dans le vase, on plonge le fil négatif dans le premier et le positif dans le second; après quinze ou vingt minutes la différence de niveau peut être de plusieurs pouces.

J'ai souvent observé un autre phénomène qui paraît tenir aux mêmes causes. Un siphon renversé contient du mercure jusqu'à 3 ou 4 pouces de hauteur dans chaque branche; lorsqu'on fait passer le courant, le mercure éprouve des oscillations sensibles; mais si d'un côté l'on verse une dissolution saline dans laquelle on plonge le fil négatif, tandis que de l'autre côté le fil positif touche au mercure,

alors la dissolution se glisse peu à peu entre le verre et le mercure, et bientôt elle passe en totalité dans l'autre branche.

Dans d'autres circonstances on observe encore, au milieu des masses liquides, des mouvements singuliers qu'il est excessivement difficile de décrire, tant ils sont nombreux et changeants. Je vais essayer d'en donner une idée, en remarquant toutefois, qu'après avoir fait de nombreuses expériences sur ce sujet, il m'a été impossible d'en saisir la loi.

M. Erman avait remarqué, dès 1808, que des globules de mercure prennent un mouvement de rotation très rapide lorsqu'ils sont en contact avec certains corps, ou exposés au courant de la pile (*Ann. der Phys.*, de Gilbert, t. XXXI, pag. 201).

Sir H. Davy, dans ses *Éléments de philosophie chimique*, rapporte un phénomène analogue: ce de l'eau contenant 1/2000 de sulfate de potasse était dans un large vase en verre, de 10 pouces de diamètre, et quelques globules de mercure déposés au fond du vase éprouvaient une vive agitation lorsqu'on faisait plonger dans l'eau les deux fils d'une forte batterie. Ces globules s'allongeaient du côté négatif, et l'on voyait un rapide courant d'oxide s'établir du pôle positif vers le négatif. En même temps du potassium s'amalgamait avec le mercure; car, les communications étant supprimées, on voyait des bulles d'hydrogène paraître autour des globules, et l'on reconnaît par les réactifs qu'il se formait de la potasse.

M. Serullas a pareillement observé les mouvements gyroïdes que prennent les divers alliages de potassium ou de sodium, lorsqu'on en met des fragments sur un bain de mercure sec ou sur un bain de mercure couvert d'une petite couche d'eau. Il a fait ses expériences sur les alliages que forme le potassium, avec l'antimoine, le bismuth, le plomb, le fer ou l'étain; et il a constaté, 1^o que quand l'un ou l'autre de ces alliages, en tournant sur le mercure, se décompose, soit par l'amalgamation du potassium, soit par son oxidation au dépens de l'eau qui couvre le bain, il se forme une pellicule noire qui a la propriété singulière d'être attirée par une tige métallique quelconque plongée dans le bain, mais plongée jusqu'au contact du mercure; 2^o que cette pellicule est aussi attirée par le fil négatif de la pile et repoussée par le fil positif, ou agitée de l'un à l'autre lorsqu'on les plonge simultanément dans l'eau, ou l'un dans l'eau et l'autre dans le mercure (*Journal de Physique*, t. XCII et t. XCIII).

M. Herschell a poussé beaucoup plus loin ses ingénieuses recherches sur ce sujet délicat (*Ann. de Phys. et de Chimie*, t. XXIII, pag. 280). Il a prouvé par des expériences directes que des parcelles de substances étrangères, par exemple des millièmes de potassium ou de sodium, suffisent pour modifier complètement les propriétés du mercure exposé à l'influence du courant. En employant

d'après cette indication, du mercure parfaitement pur, voici les phénomènes que l'on observe :

1°. Quatre ou cinq cents grains de mercure, dans un vase en verre ou en porcelaine, sont recouverts d'une couche d'acide sulfurique de quelques lignes d'épaisseur ; deux fils de platine formant les pôles d'une pile même très faible sont plongés dans l'acide : et à l'instant le mercure éprouve une violente agitation. Si les deux pôles sont de chaque côté du globule, à une certaine distance de ses bords, on le voit s'allonger, surtout du côté négatif, et l'on distingue une foule de courants qui sillonnent sa surface en se dirigeant du pôle négatif au positif ; en même temps l'acide est lui-même agité, et dans les points où il touche au mercure, il semble comme balayé en violemment entraîné. Si l'un des fils est verticalement au-dessus du mercure, on aperçoit comme un souffle qui détermine des ondulations circulaires, ou d'autres fois une sorte d'attraction qui semble soulever une petite montagne de liquide. Si les deux fils forment une espèce de triangle avec le globule, celui-ci se met à tourner sur lui-même en cheminant obliquement jusqu'à ce qu'il atteigne le fil négatif.

En remplaçant l'acide sulfurique par d'autres acides plus ou moins concentrés ou par des dissolutions salines, on observe des effets analogues qui paraissent ne différer que par leur intensité.

Les dissolutions alcalines concentrées semblent complètement paralyser ces mouvements ; au-dessus d'elle le mercure *exactement purifié*, en contenant seulement de l'or, de l'argent, du cuivre ou d'autres métaux *électro-négatifs*, n'éprouve

aucun des phénomènes que nous venons de décrire ; il reste en repos, et la dissolution elle-même ne semble plus agitée que par les bulles gazeuses qui résultent de sa décomposition. C'est en profitant de cette propriété remarquable que M. Herschell s'est assuré que des atomes de métaux *électro-positifs* sont suffisants pour lui donner une activité très énergique. Par exemple, sous la dissolution de soude, en touchant le mercure pendant 1" avec le pôle négatif, il se forme du sodium qui s'amalgame avec lui, et dès cet instant, le courant n'étant plus établi que par la dissolution, le mercure tourne, s'agite, et se trouve sillonné par des courants considérables. L'analyse directe fait voir que dans ce contact si court la quantité de sodium qui peut se former est à peine un millionième de celle du mercure.

Quand le mercure est en repos sous une dissolution de soude ou de potasse traversée par le courant de la pile, si l'on y porte avec la pointe d'une aiguille un atome d'amalgame de zinc, à l'instant l'agitation commence et les courants se manifestent.

Le plomb, le fer et l'étain jouissent aussi de cette propriété, mais à un moindre degré.

Lorsqu'on fait passer un courant dans le muriate de baryte, avec l'attention de tenir un globule de mercure en contact avec le fil négatif, on aperçoit bientôt, même avec une faible pile, un amalgame de barium qui se forme en belles arborisations ; il est solide, cristallise, et se conserve assez facilement. Quelques atomes de cet amalgame, portés dans le mercure qui reste en repos sous une dissolution alcaline, produisent à peu près le même effet que l'amalgame de zinc.

CHAPITRE X.

DES PILES SÈCHES.

404. *Construction des piles de Zamboni.* — Dans les piles sèches, les *éléments électro-moteurs* sont encore des substances métalliques ; mais le *conducteur* qui sépare les différents couples n'est plus une dissolution liquide ; c'est un corps solide quelconque, parfaitement sec, ou légèrement humide, ou imbibé de quelque substance qui ne soit pas absolument imperméable à l'électricité ; car il faut toujours que les fluides électriques, développés au contact des métaux, puissent avec le temps circuler dans toute l'étendue de la pile. Entre toutes les dispositions qui ont été successivement indiquées par d'habiles observateurs, celle de M. Zamboni paraît une des plus efficaces. On

prend des feuilles de papier ordinaire, un peu fort et humide, autant qu'il pourrait l'être naturellement par un temps pluvieux ; d'un côté on colle avec la gélatine, la gomme ou l'amidon, une feuille de zinc laminé et ensuite battu ; sur le revers on met du peroxyde de manganèse très bien porphyrisé, en l'étalant à plusieurs reprises avec un bouchon, ou seulement avec un morceau de papier. Alors on superpose dans le même ordre plusieurs feuilles semblables, et, avec un emporte-pièce de 10 à 15 lignes de diamètre, on enlève à chaque fois autant de disques qu'il y a de feuilles. Ces disques sont, à leur tour, superposés dans le même ordre, et l'on fait ainsi des piles de

500, de 1000 ou de 2000 couples. Pour mieux assurer le contact, on maintient les disques serrés sous une presse, et en même temps, pour les garantir du contact de l'air, on enduit toute la colonne qu'ils forment d'une couche de gomme laque, d'une ou de deux lignes d'épaisseur. A l'extrémité zinc, et en contact immédiat avec le métal, il est bon de mastiquer aussi de la même manière une plaque de zinc un peu épaisse de même diamètre que les disques, sur laquelle on peut visser une bœule ou toute autre masse métallique qui ferme alers l'un des pôles de la pile; à l'autre extrémité, l'autre pôle est fermé par un ajustement pareil fait avec une plaque de cuivre.

Quelquefois on imbibé le papier avec une légère dissolution saline ou bien avec du lait, du miel, du beurre, de l'huile d'œillette, de l'essence de térébenthine, etc.; mais si les piles qui sont faites par ces moyens ont l'avantage de paraître un peu plus fortes dans les premiers instans, elles ont aussi l'inconvénient très grave de se détériorer promptement, en comparaison des premières; car il est rare qu'après quelques années elles conservent encore toute leur énergie primitive.

Au lieu d'employer le zinc avec l'oxide de manganèse, on peut sans désavantage employer l'étain.

En général, on peut employer deux métaux quelconques, pourvu qu'ils ne soient pas trop voisins l'un de l'autre par leur tendance électrique; par exemple, l'or, l'argent ou le platine ne pourraient être employés ensemble avec succès, parce qu'ils ont à peu près une même énergie électro-négative.

Les premiers essais sur les piles sèches remontent presque au commencement du siècle; en 1803, M. Hachette et Desormes avaient employé des couples ordinaires de zinc et de cuivre, séparés par de la colle d'amidon. Un peu plus tard M. Biot imagina d'employer comme conducteur le nitrate de potasse fendu, qui est parmi les sels un des meilleurs conducteurs. En 1809, Deluc présenta à la société royale de Londres un appareil de 600 paires, composé avec du zinc laminé et du papier cuivré. Enfin Zamboni fit connaître, en 1812, en Italie, et en 1814, à Paris, la pile dont nous venons de donner la description.

405. *Propriétés des piles sèches.* — Une pile de Zamboni, composée par exemple de 2000 paires, ne peut donner la moindre commettien ni produire la moindre décomposition chimique; cependant, si l'on touche l'un des pôles avec un plan d'épreuve, on y prend une charge sensible, et au moyen de la balance électrique on peut comparer entre elles les tensions des différentes piles, ou les tensions que donne une même pile à différentes époques; de même en touchant l'un des pôles pendant un instant, avec le condensateur à taffetas, on obtient une telle charge qu'il est quelquefois possible d'en tirer une forte étincelle. Cette différence

si prodigieuse qui se remarque entre une pile de 2000 paires, chargée avec du papier humide, et une pile de 2000 paires paillees, chargée avec de l'eau acidulée, tient seulement à l'imperfection de la conductibilité des rondelles de papier ou des autres corps qui séparent les différents couples: dans le premier cas, il se produit au contact des métaux tout autant d'électricité que dans le second; mais les fluides ne peuvent se transmettre que lentement pour arriver jusqu'au pôle, et c'est cette lenteur qui détermine les conditions d'équilibre dont nous allons faire l'analyse.

1°. Si la pile est isolée par les deux pôles et abandonnée à elle-même dans de l'air parfaitement sec, les électricités que le contact développe sur tous les élémens se propagent peu à peu au travers du conducteur imparfait, et s'accumulent, l'une au pôle positif, l'autre au pôle négatif. La condition rigoureuse de l'équilibre serait, qu'après un temps suffisamment long, il y eût à chaque pôle autant de tension que dans une pile à conducteur liquide du même nombre d'élémens; mais, d'une part, le fluide vitré qui vient au pôle positif, par exemple, est arrêté dans son mouvement de propagation par la somme de toutes les résistances qu'il doit vaincre pour arriver jusqu'au dernier élément: d'une autre part, il se perd à mesure qu'il arrive, parce que l'air, même le plus sec, s'électrise au contact des surfaces électrisées; ainsi, la tension cesse d'augmenter, et l'équilibre est établi dès que la quantité de fluide qui arrive, après avoir vaincu toutes les résistances, est égale à la quantité de fluide qui se dissipe par le contact de l'air. A partir de cet instant, la force de la pile sera constante, les fluides paraîtront immobiles et comme fixés à ses deux extrémités; mais il ne faut pas perdre de vue qu'en réalité ils sont sans cesse en mouvement, se perdant toujours par l'air et se reproduisant toujours; c'est un *équilibre mobile* et non pas un *équilibre stationnaire*.

2°. Il est évident, par ce qui précède, que la même pile, transportée dans de l'air de plus en plus humide, y paraîtra de plus en plus faible, car la cause qui reproduit le fluide reste la même, tandis que la cause qui l'enlève augmente avec l'humidité; il faut donc qu'un nouvel équilibre s'établisse, et il s'établit en effet, lorsque la tension est affaiblie à tel point que l'air humide, en agissant sur cette tension moindre, enlève précisément autant de fluide que l'air sec en enlève en agissant sur une tension plus grande.

3°. Lorsqu'une pile sèche, au lieu d'être abandonnée à elle-même dans l'air sec ou humide, est tellement disposée qu'en lui enlève directement une partie de son fluide, elle présente alors des phénomènes encore plus variés, mais tout aussi faciles à expliquer par les mêmes considérations de l'équilibre mobile. Supposons, par exemple, que l'on dispose à côté de l'une de l'autre deux piles de 2000 couples chacune, fermant deux colonnes

d'environ un pied de hauteur : leurs pôles supérieurs sont, l'un positif, et l'autre négatif; leurs pôles inférieurs communiquent entre eux par une bande de métal : par cette disposition, les deux piles, en réalité, n'en forment qu'une seule de 4000 couples; car c'est exactement comme si l'on avait pris une pile de 4000 couples, et qu'on l'eût brisée par le milieu en conservant une communication entre les deux sections de rupture. Imaginons maintenant que l'on suspende entre les deux pôles contraires supérieurs, et à une égale distance, une aiguille métallique légère, parfaitement mobile, et isolée. Cette aiguille, également attirée par les deux pôles, n'aura pas de raison pour aller à l'un plutôt qu'à l'autre; elle restera immobile. Mais si une première cause la dérange, elle va, sous certaines conditions, faire un mouvement *perpétuel*. En effet, arrivant, par exemple, au contact du pôle positif, elle s'y charge d'électricité positive, se trouve repoussée par ce pôle et attirée par l'autre, qu'elle vient toucher à son tour; sur celui-ci, elle dépose l'électricité positive qu'elle avait prise au premier, se charge d'électricité négative, se trouve repoussée du nouveau et attirée en sens contraire; elle revient donc au pôle positif, retourne au pôle négatif et ainsi de suite. Une aiguille bien ajustée semble devoir exécuter ces oscillations régulières sans trouble et sans repos, aussi long-temps que l'on voudra. Mais il y a toujours quelque accident qui dérange ou qui arrête ce mouvement que l'on avait pris d'abord pour une sorte de mouvement *perpétuel*. Dans ce cas, il y a deux causes qui enlèvent l'électricité de la pile, savoir, l'air et l'aiguille; et une seule cause toujours constante qui la reproduit. Si pour un état donné de l'air, l'aiguille est tellement combinée pour sa forme, ses dimensions et la rapidité de ses oscillations, que la somme des quantités de fluides enlevée par elle et par l'air soit justement égale à la quantité de fluide qui se développe dans le même temps, il y aura compensation parfaite; les oscillations seront régulières, isochrones, et se continueront aussi long-temps que les choses resteront dans cet état. Mais si l'air devient plus sec, les oscillations seront plus rapides; s'il devient plus humide, elles seront plus lentes; et s'il devient plus humide encore, l'aiguille pourra s'arrêter. Voilà comment s'expliquent toutes les singularités bizarres, et pour ainsi dire tous les caprices de l'appareil que nous venons de décrire; ou le voit, en effet, marcher tantôt vite, tantôt lentement, s'arrêter par intervalles, puis reprendre sa marche après un temps plus ou moins long. Si même on veut l'arrêter à volonté, rien n'est plus facile; il suffit de souffler sur les pôles, ou de les toucher un instant avec la main ou avec un bon conducteur; car toute la pile se décharge, et il lui faut souvent quelques heures pour reproduire les quantités de fluide capables de déterminer les mouvements de l'aiguille.

Dans les premiers temps de l'invention de la pile sèche, ces périodes et ces intermittences de mouvement avaient été prises par quelques observateurs pour des signes ou pour des présages liés aux phénomènes météorologiques. Mais l'on voit, par ce qui précède, qu'elles ne sont dépendantes que des variations accidentelles de l'humidité environnante.

406. *Électroscope de Bohnenberger.* — M. Bohnenberger a fait une application des piles sèches qui semble d'abord assez ingénieuse; après avoir supprimé l'une des feuilles d'or du condensateur à lames d'or, il dispose à égale distance de la feuille restante les deux pôles d'une pile très peu énergique; alors il est évident que la moindre charge d'électricité résineuse ou vitrée détermine cette feuille très mobile à se porter vers le pôle positif ou vers le négatif, et qu'une fois en mouvement elle doit continuer ses allées et venues pendant un temps plus ou moins long. Mais dans la pratique cet appareil présente de grands inconvénients; et, je dois l'avouer, jamais je n'ai pu m'en servir avec la moindre confiance. D'abord il est impossible que l'air de la cloche n'éprouve pas quelques changements de température; le contact ou même la présence de la main, à une assez grande distance, est une cause suffisante pour modifier la chaleur des parois et pour déterminer des courants d'air qui agitent la feuille d'or et qui la poussent à l'instant vers l'un ou l'autre des pôles. Ainsi l'instrument est infidèle, parce qu'il marche tout seul. Ensuite, les tensions même très faibles des deux pôles de la pile donnent avec le temps, à l'air de la cloche, des électricités contraires qui ne se recomposent pas subitement; avant d'être recomposées elles peuvent agir par contact ou par influence, et quand elles se recomposent elles excitent dans les molécules gazeuses des mouvements qui troublent encore l'équilibre instable de la lame d'or.

407. *Diagonètre de Rousseau.* — M. Rousseau, habile amateur des sciences physiques, a fait une autre application des piles sèches qui est tout-à-fait ingénieuse et qui semble devoir être très utile. Son appareil, qu'il nomme *diagonètre*, est destiné à comparer les conductibilités électriques de différentes substances. Il est représenté dans la fig. 364; il se compose essentiellement d'une pile sèche plus ou moins énergique et d'une aiguille aimantée qui ne pèse que quelques fractions de grain. Cette aiguille porte un disque de clinquant *d'*, et vers son centre de gravité elle a reçu un petit coup de pincen qui sert de chape et au moyen duquel elle se met en équilibre stable sur un pivot *ik*. Son magnétisme la ramène dans une position fixe, et sa légèreté lui permet de quitter cette position par l'influence des plus faibles forces; un arc divisé marque les différents degrés de déviation qu'elle éprouve. Un conducteur métallique *gtek* reçoit l'électricité en *g*, où il a la forme d'un disque ou

d'une tablette, et il la transmet d'une part au pivot *k*, et d'une autre part au petit plan *d* qui se trouve en présence de l'aiguille et à une très petite distance de son disque *d'*. L'appareil est porté sur un gâteau de résine ou de gomme laque *g* et recouvert d'une cloche *n'*. La pile sèche *p* qui doit servir de source constante d'électricité, est pareillement établie sur un gâteau de résine; au moment de l'expérience on fait communiquer l'un de ses pôles avec le sol, et l'on conduit le fluide de l'autre sur la tablette *g* au moyen du fil *f* *n* qui est revêtu de gomme laque et terminé par une petite boule *n* en platine. Dès que cette petite boule est mise en contact direct avec le disque *g*, l'aiguille est repoussée, et par la déviation qu'elle éprouve l'on peut comparer entre elles les tensions de la pile à diverses époques. Ensuite, pour comparer les conductibilités électriques des différents conducteurs imparfaits, on les interpose simplement entre la boule et le disque *g*, et l'on observe les déviations correspondantes. Il est bien entendu que l'on ne peut comparer ainsi que des corps solides de même forme et de même dimension, à moins que l'on n'ait, par des expériences préalables, déterminé les corrections à faire. Pour les liquides les compa-

raisons sont plus faciles, on en met successivement des volumes égaux dans un petit godet de métal *k* qui repose sur le disque *g*, et l'on prend soin de faire toucher la boule exactement de la même manière.

M. Rousseau a obtenu, avec son diognomètre, des résultats remarquables sur la conductibilité des charbons de différentes espèces, et surtout sur la conductibilité des huiles.

Les charbons qui sont employés avec le plus de succès dans la fabrication de la poudre sont en général les plus mauvais conducteurs.

Entre toutes les huiles et toutes les graisses soumises à l'épreuve du diognomètre, l'huile d'olive *parfaitement pure* est celle qui offre la moindre conductibilité. Mais si l'on verse seulement deux gouttes d'huile de faine ou d'aillette dans dix grammes d'huile d'olive, la conductibilité en est très sensiblement augmentée. De cette manière, M. Rousseau découvre les moindres traces de sophistication dans les huiles de commerce, et l'on peut dire qu'il supplée d'une manière ingénieuse et commode à l'imperfection des moyens chimiques.

LIVRE CINQUIÈME.

DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

DE L'ACTION DES COURANTS SUR LES AÎMANS.

408. *Découverte de l'électro-magnétisme.* — En 1820 M. Oersted, professeur à Copenhague, fit la découverte fondamentale sur laquelle repose l'électro-magnétisme ; on savait déjà que dans certaines circonstances les puissantes décharges électriques affectent l'aiguille aimantée ; on avait observé sur des vaisseaux frappés du tonnerre que les aiguilles de boussole perdaient la propriété de marquer la route du bâtiment, et même qu'elles pouvaient la perdre dès que le feu Saint-Elme brillait au-dessus des mâts avec une grande intensité, sans qu'il y eût explosion de la foudre. Les unes étaient dépoignées de leur magnétisme, d'autres avaient leurs pôles renversés, et d'autres enfin étaient devenues folles, c'est-à-dire qu'elles avaient reçu des points conséquens qui leur imprimaient une fausse direction. Plusieurs physiciens, parmi lesquels on peut citer Franklin, Beccaria, Wilson et Cavallo, avaient essayé de reproduire ces phénomènes par la décharge d'une bouteille de Leyde ou par celle d'une grande batterie, et ils étaient en effet parvenus à modifier le magnétisme des aiguilles très petites, soit en les mettant dans le circuit de l'explosion, soit en les exposant simplement à quelque distance de l'étincelle ; mais ces expériences n'ayant pu produire aucun phénomène régulier, on se contenta d'admettre que le choc électrique agissait alors comme le choc du martien, et le sujet fut abandonné. Un peu plus tard on fit, avec l'électricité de la pile, quelques nouveaux essais qui ne furent pas plus heureux que les premiers. Enfin, M. Oersted, guidé par des vues profondes sur l'essence même des fluides électriques, et sur la cause primitive des affinités de la matière, trouva le moyen de faire agir l'électricité sur le magnétisme d'une manière sûre et permanente. Le mode d'action une fois découvert et défini avec précision, les phénomènes fondamentaux se présenteront d'eux-mêmes à M. Oersted ; une immense carrière fut ouverte à tous les savans, et jamais peut-être on ne vit, dans une si courte période, tant de phénomènes se développer et se succéder, et la science s'enrichir de tant de vérités nouvelles.

Pour que les fluides électriques agissent sur le magnétisme, il suffit d'une seule condition : il suffit qu'ils soient en mouvement.

En effet, un fil conducteur étant traversé par le courant de la pile, si on en approche une aiguille aimantée librement suspendue, on la voit qui se dévie, qui se tourne, s'agite et qui fait une foule d'oscillations sans être attirée ni repoussée, à moins qu'elle ne soit très près. C'est la première expérience de M. Oersted. Lorsqu'on voit une action si vive, qui se fait sentir encore, même à la distance de plusieurs pieds, on s'étonne que, parmi tant d'expériences qui ont été faites avec la pile, le hasard n'ait pas une seule fois offert à l'observation un phénomène de cette nature.

La force qui produit ces mouvemens dans l'aiguille est ce que l'on appelle la *force électro-magnétique*.

Il est facile de constater, par l'expérience,

- 1^o Qu'elle diminue à mesure que la distance augmente entre le courant et l'aiguille ;
- 2^o Qu'elle s'exerce dans tous les sens et au travers de toutes les substances, excepté au travers des substances magnétiques.

De plus, elle est une force active, ne s'exerçant pas seulement sur le magnétisme libre de l'aiguille, mais s'exerçant aussi sur le magnétisme combiné, pour le décomposer quand elle peut vaincre la force coercitive. M. Arago a le premier démontré cette vérité par une expérience curieuse. Lorsqu'on présente de la limaille de fer à un fil conducteur pendant qu'il est traversé par le courant, on la voit qui s'enroule autour de lui, non pas en se hérissant sur sa surface, comme elle fait sur les aimans, mais en se couchant transversalement, de manière à former des espèces d'anneaux concentriques qui l'enveloppent. La couche de limaille dépend de la force de la pile ; elle a quelquefois trois ou quatre millimètres d'épaisseur, et dès qu'on arrête le courant, elle se détache et tombe subitement. Ainsi, la force électro-magnétique s'exerce sur le fer doux pour décomposer son magnétisme naturel ; nous verrons plus tard qu'elle

s'exerce pareillement sur l'acier, et qu'elle est très-énergique pour surmonter les forces coercitives les plus considérables.

Voici maintenant quelques suppositions qui nous seront utiles pour caractériser les phénomènes d'une manière plus commode et plus précise: nous admettrons dans le courant une *direction déterminée*, et nous la désignerons en disant qu'il va toujours du pôle positif au pôle négatif en passant par le conducteur qui joint les pôles; ainsi, quand les communications sont établies, et que le mouvement électrique s'accomplit dans tout le circuit de la pile, nous dirons, en parlant de l'arc s a qui touche au pôle positif, que le courant le traverse en passant de a en a' (Fig. 371); pareillement u a' est traversé de u en a' , a' a'' de a' en a'' et enfin c s de c en s ; et en considérant le circuit complet, nous dirons toujours que le courant va de c en a en passant par la pile, et de s en c en passant par le conducteur. Nous désignerons souvent le courant par les formes et par les dimensions du conducteur qu'il traverse; quand il passe par un conducteur rectiligne, nous l'appellerons *courant rectiligne*; par un fil très fin, *courant linéaire*; par un cylindre creux, *courant cylindrique*; par un fil courbe, *courant curviligne*; par un cercle, *courant circulaire*; par un conducteur indéfini dans sa longueur, *courant indéfini*; par un conducteur rentrant sur lui-même et formant un circuit complet, *courant fermé*, etc.; aucune de ces expressions ne doit être prise à la lettre; quand nous disons qu'il y a un courant dans le conducteur qui joint les deux pôles de la pile, nous ne voulons nullement faire entendre qu'il y a dans ce conducteur un mouvement de translation du fluide vitré depuis le pôle positif jusqu'au pôle négatif, et mouvement de translation du fluide résineux en sens inverse; car il est probable, au contraire, comme nous l'avons déjà indiqué plusieurs fois, que la recombinaison des électricités se fait autour de toutes les molécules pondérables et dans tous les intervalles qui les séparent. De même, quand nous disons que le courant a une direction depuis le pôle positif au pôle négatif, nous ne voulons pas faire entendre que les fluides électriques se meuvent seulement suivant l'axe du fil conducteur, sans éprouver de déviations latérales ou obliques à cet axe; mais dans un conducteur donné les effets n'étant pas les mêmes, si l'on touche l'une de ses extrémités a avec le pôle positif, et l'autre extrémité a''' avec le pôle négatif, ou si on le touche dans un ordre inverse, il faut bien pouvoir exprimer dans quel ordre les communications sont établies, et c'est ce que l'on fait d'une manière commode, en disant que dans le premier cas le courant se dirige de a en u''' , et de a''' en a dans le second.

409. *Le courant tend à tourner l'aiguille en croix avec lui, le pôle austral à gauche.* — La Figure 372 représente une aiguille aimantée a , au-dessous

de laquelle passe horizontalement un courant rectiligne cc' , situé dans le plan du méridien magnétique, et dirigé de c en c' ; l'aiguille est chassée hors de sa direction primitive; son pôle *austral* est poussé à l'occident, et après quelques oscillations elle s'arrête dans la position $s' a'$, éprouvant ainsi une déviation mesurée par l'arc aa' . Cette déviation augmente ou diminue suivant que l'on abaisse le courant pour l'approcher plus près de l'aiguille, ou qu'on le relève pour l'en éloigner.

Les choses étoient ramenées au premier état, si de nouveau l'on approche le courant, mais en le retournant pour qu'il aille en sens contraire de c' en c , comme il est marqué par la petite flèche ponctuée, l'aiguille éprouve encore les effets de sa présence, alors son pôle *austral* est poussé à l'orient, et c'est dans la position $a'' a'''$ qu'elle vient s'arrêter.

Ainsi, au-dessus de l'aiguille, le courant dévie le pôle austral à l'occident quand il va lui-même du sud au nord, et il le dévie à l'orient quand il vient au contraire du nord au sud.

On peut répéter les mêmes expériences en faisant passer le courant au-dessous de l'aiguille, toujours horizontalement et dans le plan du méridien magnétique; alors, chose surprenante, les effets sont précisément inverses, c'est-à-dire que le pôle austral est poussé à l'orient quand le courant va du sud au nord, et poussé à l'occident quand il vient du nord au sud.

Dans ces phénomènes la force électro-magnétique est combattue par l'action directrice que la terre exerce sur l'aiguille, et pour observer l'effet seul de cette puissance nouvelle qui agit d'une manière si énergique et en même temps si singulière, il est nécessaire de neutraliser la force terrestre: c'est ce que l'on peut faire de plusieurs manières, comme nous l'avons indiqué (303), soit avec un barreau placé horizontalement dans le plan du méridien magnétique, et sur le prolongement de l'aiguille, soit en ajoutant sur le même axe deux aiguilles de même force, ayant leurs pôles tournés en sens inverse, soit en employant l'aiguille astatique (Fig. 262); avec ces précautions on découvre le vrai caractère de la force électro-magnétique, on voit qu'elle n'est ni une force attractive, ni une force répulsive, mais une force *directrice* qui tourne toujours l'aiguille perpendiculairement au fil conducteur, sans attirer un pôle de préférence à l'autre, c'est-à-dire que la ligne des pôles est toujours *en croix* avec le courant. Pour prendre une idée plus nette de cette direction, concevons un cylindre creux, d'une longueur quelconque, et, par exemple, d'un pied de diamètre; suivant l'axe de ce cylindre, imaginons un fil conducteur traversé par le courant, et sur sa surface une aiguille aimantée qui puisse se mouvoir librement dans tous les sens, l'effet de la force électro-magnétique sera telle, que l'aiguille se mettra toujours tangentiellement au cylindre, et transversalement à ses arêtes;

on, en d'autres termes encore, si du milieu de l'aiguille, on abaisse une perpendiculaire sur le courant, l'aiguille, dans son équilibre sous l'influence de la force électro-magnétique, sera elle-même perpendiculaire au plan qui passe par cette perpendiculaire et par le courant. Ce n'est pas assez de définir ainsi la direction de l'aiguille; il faut encore assigner la position de ces pôles, déterminer de quel côté se trouve le pôle boréal, de quel côté l'austral, soit que le courant se propage dans un sens ou dans l'autre. Dans les premiers temps on éprouvait de grands embarras pour exprimer en peu de paroles ces rapports de position et de direction qui se compliquent de mille manières; mais M. Ampère a levé toutes ces difficultés au moyen d'une comparaison qui semblera peut-être aussi bizarre qu'elle est ingénieuse. M. Ampère ne se contente pas de donner une direction au courant, il lui donne encore une tête, des pieds, une droite et une gauche; il en fait un homme. Concevons dans une portion quelconque du fil conducteur une petite figure d'homme couchée dans le sens de la longueur, les pieds du côté du pôle zinc, et la tête du côté du pôle cuivre, de telle manière que, d'après notre définition précédente, le courant entre par les pieds et sort par la tête; concevons que cette figure ait toujours la face tournée vers le milieu de l'aiguille sur laquelle agit le courant, alors l'effet est tel, que l'aiguille se trouve *en croix*, comme nous venons de le voir, et toujours son pôle austral vers la gauche de la petite figure d'homme; ce que nous exprimons en disant qu'elle se tourne en croix avec le courant, son pôle austral à gauche. Cette espèce de formule singulière offre une image facile, qui supplée à une foule de paroles; ceux qui voudront l'appliquer à toutes les expériences que nous avons déjà citées, n'auront pas besoin d'un long exercice pour reconnaître qu'elle est en même temps très fidèle et très commode. Nous trouverons dans la suite quelques circonstances où elle semble être en défaut; mais il suffira alors d'une courte interprétation pour montrer qu'elle est toujours exacte.

410. *L'intensité de l'action du courant est en raison inverse de la simple distance.* — Cette loi fondamentale a été démontrée par MM. Biot et Savart par une série d'expériences que nous allons rapporter. La figure 373 représente la coupe horizontale de l'appareil; a est une aiguille aimantée, semblable aux petites aiguilles d'épreuve dont nous avons parlé (311); elle est suspendue à un fil de coton au moyen d'une petite chape de cuivre, et se trouve abritée de l'agitation de l'air par une cloche en verre. L'action de la terre est neutralisée par un barreau convenablement placé, au sorte que cette aiguille n'a plus de force directrice; elle est indifférente et prête à obéir sans résistance aux nouvelles forces que l'on fait agir sur elle; enfin, c représente la section d'un gros fil de cuivre de huit ou dix pieds de long, tendu verticalement et traversé par un courant, tantôt de bas en bas,

tantôt de bas en haut; pour fixer les idées, nous supposons que le courant est ascendant: ce fil, toujours vertical, peut être porté à diverses distances de l'aiguille, qui, dans toutes ses positions, correspond sensiblement au milieu de sa longueur. D'après la loi que nous venons d'indiquer, l'aiguille se met en croix avec le courant, le pôle austral à gauche, comme le représente la figure, mais pour peu qu'on l'écarte de cette position, elle y revient par des oscillations isochrones, dont la durée dépend de l'énergie de la force électro-magnétique. Le nombre des oscillations faites dans un temps donné, la distance du courant et l'intensité de la force qu'il exerce, sont donc trois choses liées entre elles.

Dans une première expérience, soit x la distance du courant au milieu m de l'aiguille, x' l'intensité de la force qu'il exerce, et n le nombre des oscillations qui s'exécutent dans un temps donné, dans 1^{re} par exemple :

Dans une deuxième expérience, soient x' , x'' et x''' , les quantités analoges.

Les intensités des forces qui produisent des oscillations isochrones étant toujours entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations, exécutées dans le même temps, nous aurons (311) :

$$\frac{x}{x'} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

Ainsi, après avoir observé les oscillations, il nous sera facile de comparer les intensités des forces. Voici le tableau des résultats qui ont été obtenus par MM. Biot et Savart.

Ordre des observations.	Distance du courant au centre de l'aiguille.	Durée de dix oscillations.
1	30 mm	42 ^{re} 25
2	40	48,85
3	50	42,00
4	20	33,50
5	30	41,00
6	50	54,75
7	30	42,25
8	60	55,75
9	30	41,75
10	120	89,00
11	30	42,50
12	15	30,00
13	30	43,15

On voit dans ce tableau plusieurs observations faites à la même distance, parce que, l'activité de la pile étant soumise à de grandes variations, même dans un temps assez court, il était nécessaire de la plonger et de la retirer souvent, et par conséquent de revenir souvent à la même distance pour reconnaître si la force avait une constance suffisante.

Avec ces données il est facile de découvrir la loi de l'intensité suivant les variations de la distance; on voit au premier coup d'œil que pour une

distance double la force devient sensiblement moitié moindre; et si l'on pose en général

$$\frac{R}{R'} = \frac{D'}{D},$$

on en déduira

$$\frac{R^2}{R'} = \frac{D'}{D}$$

ou

$$R' = R \sqrt{\frac{D'}{D}}$$

ou

$$T' = T \sqrt{\frac{D'}{D}}$$

en désignant par T et T' les durées de 10 oscillations. Or, en prenant pour D la distance de 30 millimètres, pour T la valeur correspondante, et pour D' les autres distances successives, on obtient des valeurs de T' assez peu différentes de celles qui ont été données par l'expérience : ces valeurs calculées sont rassemblées dans le tableau suivant, à côté des valeurs observées.

NOS des observations	DISTANCE DU COURANT AU COURBÉ DE L'AIGUILLE.	DURÉE DE 10 OSCILLATIONS.		EXCÈS DU CALCUL.
		calculé.	observé.	
9	40 mm.	48'' 62	48'' 85	-0'' 23
4	50	33,88	33,50	+0,38
6	50	55,74	54,75	+1,01
8	60	59,40	56,75	+2,65
10	120	84,25	89,00	-4,75
12	15	30,99	30,00	+0,99

Les différences entre le calcul et l'observation sont assez faibles pour que l'on puisse les attribuer aux variations inévitables qu'éprouve l'activité de la pile pendant la durée des expériences. Nous pouvons conclure, par conséquent, que l'intensité de la force électro-magnétique est en raison inverse de la simple distance.

Mais il ne faut pas perdre de vue que, d'après la disposition de l'appareil, le courant est rectiligne et d'une longueur que l'on peut regarder comme indéfinie par rapport à la longueur de l'aiguille, et surtout par rapport à sa distance; c'est sous ces conditions seulement que la loi est vraie. M. de Laplace a démontré que la force électro-magnétique élémentaire, c'est-à-dire celle qui est exercée par une seule section du courant, est en raison inverse du carré de la distance, comme toutes les autres forces connues, et proportionnelle au sinus de l'angle formé par la direction du courant et par la ligne menée du milieu de cette section au milieu de l'aiguille. En effet, en calculant d'après ce principe la somme de toutes les actions élémentaires qui sont

exercées sur une petite aiguille, par un courant rectiligne indéfini, on trouve que l'intensité de cette résultante totale doit diminuer, comme l'expérience l'indique, c'est-à-dire en raison inverse de la distance.

Il résulte encore, de cette même loi de la force élémentaire, que l'intensité de l'action d'un courant angulaire indéfini, tel que $SA S'$ (Fig. 383) sur une aiguille ab , est en raison inverse de la distance aA , comme celle d'un courant rectiligne, mais qu'elle est proportionnelle à la tangente de la moitié de l'angle $SA S'$; ainsi, en prenant pour unité l'intensité de l'action de $SA S'$ sur l'aiguille ab , l'intensité de l'action de $SA S'$ serait représentée par

$$\frac{1}{\tan \frac{1}{2} SA S'}.$$

C'est ce que M. Biot a aussi vérifié par l'expérience; et l'on voit que, si le courant $SA S'$ se redresse au point de se confondre avec SA , il arrive que, l'angle $SA S'$ étant alors un angle droit, la tangente de $1/2 SA S'$ devient égale à l'unité, comme cela doit être.

Les courants rectilignes ou angulaires que nous employons dans nos expériences ne peuvent jamais être indéfinis, et par conséquent ne peuvent jamais donner des résultats mathématiquement conformes aux lois que nous venons d'indiquer; mais cependant la connaissance de ces lois, sur lesquelles repose toute la théorie, est même indispensable dans la pratique pour donner une idée au moins approximative de l'intensité des forces qui sont en jeu.

Quand les courants suivent des lignes courbes de différentes formes, il faut nécessairement recourir à des calculs plus ou moins compliqués pour déterminer, par les lois précédentes, l'intensité des phénomènes qu'ils doivent produire.

411. *Conditions d'équilibre d'une aiguille aimantée soumise à l'action d'un courant rectiligne indéfini.* — Dans un mémoire présenté à l'Académie des sciences, en 1822, imprimé par extrait dans les *Annales de chimie* (t. XXI, p. 77), et dans le *Précis élémentaire* de M. Biot, j'essayai d'établir, par un grand nombre d'expériences, un principe général au moyen duquel on peut expliquer et même calculer tous les phénomènes électro-magnétiques résultant de l'action mutuelle qui s'exerce entre les aimans et les courants. Les faits nombreux qui étaient alors sous ma main furent enchaînés pour la première fois, et les nouvelles recherches qui ont été faites depuis sont venues se rattacher au même principe, et donner ainsi autant de confirmations de son exactitude. M. Ørsted avait remarqué que le courant placé à une très petite distance des aiguilles exerce sur elles des actions singulières, qu'il les attire ou les repousse suivant sa position, et que d'autres fois il les tourne en sens contraire, c'est-à-dire le pôle austral à droite. M. Faraday sut tirer de ce phénomène une découverte importante, dont nous parlerons bientôt,

celle de la rotation des aimans ; mais on ne savait pas la cause de ces alternatives , et pour ainsi dire de ces renversemens de la force électro-magnétique. Pour la découvrir , je dirigeai mes expériences en cherchant surtout à distinguer les actions séparées du courant sur chacun des pôles de l'aiguille : car on pouvait supposer, ce qui est en effet la vérité, que le courant agit toujours de la même manière sur le même pôle, et que les changemens d'attraction en répulsion provenaient sans doute de quelques circonstances qui rendaient prédominante tantôt l'action de l'un des pôles, tantôt celle de l'autre.

C'est en faisant ainsi l'analyse de toutes les forces que je fus conduit au principe suivant : l'action qui s'exerce entre un courant rectiligne indéfini et le pôle d'un aimant forme une système de deux forces parallèles, égales et contraires, composant un couple ; ces forces sont perpendiculaires au courant et perpendiculaires à la plus courte distance du courant au pôle de l'aimant, et leur direction est telle que le pôle austral est toujours poussé à gauche, et le pôle boréal toujours à droite ; l'intensité de ces forces est en raison inverse de la distance du courant au pôle de l'aimant. Ce principe est encore vrai lorsqu'on l'applique à une petite section quelconque d'un courant, et alors le couple est perpendiculaire à la ligne qui joint le centre de cette section au pôle de l'aimant, et son intensité, toujours en raison inverse de la distance, est proportionnelle au sinus de l'angle que la direction de cette ligne fait avec la direction du courant. Par exemple, si nous considérons une aiguille AB (Fig. 374) et un courant ascendant perpendiculaire au plan de la figure, dont la coupe est représentée en c , l'action totale de ce courant sur le pôle austral A formera le système de deux forces $A\tau$ et $A\tau'$, la première désignant l'action et l'autre la réaction ou *vice-versa* ; de même, entre le courant et le pôle B , il y aura un autre couple $B\tau'$ et $B\tau$. Si le courant est fixe et l'aiguille mobile, les deux forces $A\tau$ et $B\tau'$ pourront seules produire du mouvement ; leur intensité relative, leur obliquité et la longueur des bras de leviers par lesquels elles agissent, déterminent alors le sens de la rotation ou la position d'équilibre. Cela posé, on peut résoudre par le calcul ce problème général, qui embrasse toute la théorie de l'électromagnétisme proprement dit, c'est-à-dire, tous les phénomènes produits par l'action mutuelle des courans sur les aimans, ou des aimans sur les courans. Étant donné un courant de forme quelconque, fixe, ou mobile autour d'un point ou autour d'un axe connu, et un aimant à deux ou à plusieurs pôles, pareillement mobile autour d'un point ou autour d'un axe, déterminer les mouvemens et les positions d'équilibre de l'aimant et du courant. Pour indiquer la marche des calculs, je rapporterai, dans la note suivante, un seul cas particulier très simple, qui a l'avantage d'offrir

plusieurs résultats qui se présenteront souvent dans les expériences.

Soit A et B , deux axes rectangulaires, fig. 374 ;
 A le pôle austral d'une aiguille ;
 B son pôle boréal ;
 λ sa longueur ou plutôt la distance de ses pôles ;
 M son milieu ;

F un axe fixe, autour duquel elle peut tourner, et dont l'abscisse est X ;

C la position d'un courant, supposé perpendiculaire au plan des axes, et dont les coordonnées sont x et y .

Si on désigne par i l'intensité de la force qu'il exerce à la distance λ pour faire tourner le pôle austral à gauche et le pôle boréal à droite,

Alors,

$$A \text{ est sollicité par } \begin{cases} \cos. a \\ \frac{C A}{\sin. a} \end{cases}, \text{ qui tend à faire tourner ;}$$

$$\begin{cases} \frac{C A}{\sin. a} \\ C A \end{cases}, \text{ qui tend à faire glisser ;}$$

$$B \text{ est sollicité par } \begin{cases} \cos. b \\ \frac{C B}{\sin. b} \end{cases}, \text{ qui tend à faire tourner ;}$$

$$\begin{cases} \frac{C B}{\sin. b} \\ C B \end{cases}, \text{ qui tend à faire glisser ;}$$

Si l'axe est fixe, l'aiguille ne pourra glisser, et pour qu'elle ne tourne pas il suffit que deux conditions soient remplies :

$$1^{\circ}. \text{ Que les deux forces } \frac{\cos. a}{C A} \text{ et } \frac{\cos. b}{C B} \text{ agissent dans}$$

le même sens, si F est entre les pôles, et en sens contraire s'il est au dehors ;

2^o. Que ces forces soient en raison inverse des bras de levier X et $\lambda - X$.

L'équation d'équilibre est donc

$$\frac{\cos. a}{C A} \frac{\lambda - X}{X} = \frac{\cos. b}{C B} \frac{X}{\lambda - X}$$

$$\text{ou } y^2 = \frac{x(X-x)(\lambda-x)}{\lambda-X-x}$$

Cette équation est le lieu des points où il faut placer le courant pour qu'il n'imprime à l'aiguille aucune déviation ; les courbes qu'elle représente changent de nature quand X change de grandeur, c'est-à-dire suivant que l'axe de rotation est entre les pôles ou exactement sur l'un d'eux, ou sur le prolongement de la ligne qui les joint. Il est facile de les discuter et de les construire dans ces différents cas.

Premier cas. — L'axe de rotation est au milieu de l'aiguille.

$$\text{On a } \frac{\lambda}{2} = X.$$

$$\text{L'équation devient } y^2 = \frac{x(\lambda - 2x)(\lambda - x)}{\lambda - 2x} \text{ et ss}$$

$$\text{décompose en deux } \begin{cases} \lambda - 2x = 0 \\ y^2 + x^2 - \lambda x = 0. \end{cases}$$

La première est celle d'une ligne droite, LL', fig. 375, perpendiculaire à l'aiguille et passant par son milieu;

La deuxième est celle d'un cercle à s B s', fig. 375, qui a son centre au milieu de l'aiguille, et qui a pour

rayon $\frac{A}{2}$, ou la moitié de sa longueur.

Voilà les courbes où l'action du courant change de signe; elles sont les limites où la force attractive devient répulsive, et vice versa, et cela ne tient pas, comme on le voit, à un renversement de la force, mais simplement à la différence de ses intensités sur les deux pôles de l'aiguille.

Il est facile à présent de calculer tous les effets du courant, soit qu'il se trouve sur ses limites, ou au dehors ou au dedans.

1°. Si le courant est placé sur la ligne droite ou sur le cercle, il n'agit plus pour faire tourner l'aiguille, mais il agit encore pour l'attirer ou la repousser parallèlement à elle-même, ou pour imprimer à son centre un mouvement plus ou moins oblique à sa direction.

Quand le courant est sur la droite, les deux forces

$\frac{\sin \alpha}{CA}$ et $\frac{\sin \beta}{CB}$ sont toujours égales et contraires et se

produisent nul effet, si ce n'est pour ramener l'aiguille

par une série d'oscillations; mais les deux forces $\frac{\cos \alpha}{CA}$ et

$\frac{\cos \beta}{CB}$, qui sont parallèles égales, agissent dans le

même sens, et donnent lieu à une résultante unique qui a pour intensité

$$\frac{2 \cos \alpha}{CA} = \frac{4 \lambda}{4y^2 + \lambda^2};$$

cette résultante est appliquée au centre de l'aiguille et agit toujours suivant ML, fig. 375, soit que le courant se trouve sur ML', soit qu'il se trouve sur ML. Cette force est donc répulsive dans le premier cas, et attractive dans le second; son intensité est en raison directe de la longueur λ , et en raison inverse du carré de la distance quand λ^2 est très petit, par rapport à y^2 .

Quand le courant est sur le cercle, les deux forces

$\frac{\cos \alpha}{CA}$ et $\frac{\cos \beta}{CB}$ sont encore égales et donnent une résultante unique, qui est alors $\frac{2}{\lambda}$, et qui ne cesse pas d'agir

suivant ML; elle se combine avec la différence des

forces $\frac{\sin \alpha}{CA}$ et $\frac{\sin \beta}{CB}$, qui est $\frac{\lambda - 2x}{\lambda y}$, et qui agit suivant MA, pour $x < \frac{\lambda}{2}$, et suivant MB pour $x > \frac{\lambda}{2}$.

Leur résultante est $\frac{1}{y^2}$ et on voit qu'elle agit tantôt pour

amener le milieu de l'aiguille vis-à-vis le courant, tantôt pour l'en repousser.

2°. Si l'on place le courant hors des limites, et dans un point quelconque de l'espace qui environne le cercle, soit à droite soit à gauche de la perpendiculaire LL',

fig. 375, alors la force de rotation du pôle austral et celle du pôle boreal ne peuvent plus se détruire, et l'aiguille est toujours forcée de tourner. La force qui produit ce mouvement étant exprimée par

$$\frac{(y^2 + x^2 - \lambda x)(2x - \lambda)}{(y^2 + x^2)(y^2 + (\lambda - x)^2)},$$

on voit qu'elle est toujours négative pour $x < \frac{\lambda}{2}$, c'est-à-dire quand le courant est à gauche de LL', d'où il suit que dans toutes ces positions la force du pôle boreal est celle qui donne le sens au mouvement; et comme elle agit toujours du même côté de ML, il en faut conclure que l'aiguille est sans cesse sollicitée à tourner du même côté, et qu'elle ne s'arrête en position stable que quand la direction de L M arrive sur le courant.

Au contraire, pour $x > \frac{\lambda}{2}$, c'est-à-dire quand le courant est à droite de LL', la différence des forces est toujours positive, et celle du pôle austral l'emporte toujours sur celle du pôle boreal; ainsi l'aiguille est encore forcée de tourner, et par un mouvement inverse elle arrive encore à la même position de stabilité. Ce résultat est précisément celui des premières expériences de M. Ørsted; mais le calcul montre que tous les renversements d'action; que ces attractions du pôle austral qui se changent si vite en répulsions quand le courant passe de l'autre côté, ou, comme on dit, quand il le regarde par une autre face; que ce détour qu'il prend pour gagner sa position de stabilité, en décrivant trois quarts de son arc d'un seul qu'il pourrait décrire pour arriver au même point; enfin que tous les mouvements de l'aiguille, qui paraissent si singuliers, quand on ne considère que l'action d'un seul pôle, deviennent des choses simples et parfaitement claires quand on considère l'action comme elle est, dans la réalité, et qu'on tient compte des modifications qu'elle éprouve sur un pôle et sur l'autre.

Quand l'aiguille est arrêtée dans sa position de stabilité, et qu'on l'en écarte, elle y revient par une série d'oscillations.

Il est facile de voir maintenant quelles forces produisent ces mouvements et quelles lois elles suivent, à raison de la longueur de l'aiguille; soit λ , fig. 375, la position du courant, et $\lambda \lambda$ sa distance au milieu M de l'aiguille: ces phénomènes se passent, comme si, pendant ses oscillations, le point λ décrivait un arc de cercle GG', dont le rayon est λ , et l'intensité de l'action du courant est la même que si, laissant l'aiguille en repos, on le faisait passer sur les divers points de GG'. L'équation de ce cercle est

$$y^2 + x^2 - \lambda x = \lambda^2 \frac{(4\lambda^2 - 1)}{4}.$$

L'intensité de la force, qui est en général

$$\frac{(y^2 + x^2 - \lambda x)(2x - \lambda)}{(y^2 + x^2)(y^2 + (\lambda - x)^2)},$$

devient donc

$$\lambda^2 \frac{(4\lambda^2 - 1)}{4} (2x - \lambda)$$

$$\left(\lambda x + \lambda^2 \frac{(4\lambda^2 - 1)}{4} \right) \left(\lambda^2 - \lambda x + \lambda^2 \frac{(4\lambda^2 - 1)}{4} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{et en faisant} \quad x &= \frac{\lambda}{a} - k\lambda \\ &= \frac{(4k^2 - 1)}{4} \\ &= \frac{(4k^2 + 1)}{4} \end{aligned}$$

dont la valeur approchée, quand k est très grand, se réduit à —.

Ainsi, l'intensité de la force que le courant exerce sur l'aiguille pour la faire osciller, est bien en raison inverse de la longueur de l'aiguille, et en raison inverse de sa distance au milieu des deux pôles; mais elle ne suit rigoureusement cette progression décroissante qu'en supposant le courant placé à une distance très grande, par rapport à la distance des pôles. Quand M. Biot a déterminé par l'expérience cette loi fondamentale, il a fait usage d'une aiguille très courte, et n'a pu reconnaître les irrégularités que je parle; s'il n'avait pas été conduit par d'autres raisons à choisir une très petite aiguille et à la placer très loin du courant, il aurait vu qu'à une distance plus petite que la demi-distance des pôles, il n'y a pas oscillation, mais renversement de l'aiguille; qu'à une distance égale à la demi-distance des pôles, la force d'oscillation est exactement nulle; que les forces qui font osciller à deux distances, dont l'une est égale à la longueur de l'aiguille et l'autre double de cette longueur, ne lient d'être entre elles comme 2 à 1, sont entre elles comme 283 est à 25n; que les forces qui font osciller à deux distances, dont l'une est double de l'aiguille et l'autre quadruple, sont entre elles comme 1,9 est à 1. En général le rapport de ces forces pour deux distances $k\lambda$ et $k'\lambda$ étant exprimé par

$$\frac{k(4k^2 - 1)(4k'^2 + 1)^2}{k'(4k'^2 - 1)(4k^2 + 1)^2}$$

il ne peut devenir — que par k très grand, comme dis

on vingt fois la longueur de l'aiguille.

3°. Si le courant est placé dans l'intérieur des limites où l'action est nulle, c'est-à-dire au dedans du cercle à s B s' , alors il arrive comme au dehors des limites, que les deux forces qui tendent à produire les rotations, cessent d'être égales et du même côté, font en effet tourner l'aiguille sur son axe. Mais la différence de ces forces

$$\frac{(y^2 + x^2 - \lambda x)(2x - \lambda)}{(y^2 + x^2)(y^2 + (\lambda - x)^2)}$$

au lieu d'être négative & gauche de $s s'$, est maintenant positive, et réciproquement; en sorte qu'on dedans du cercle l'action est précisément inverse de ce qu'elle est au dehors, et ce renversement n'a pas lieu seulement pour le sens de rotation de l'aiguille, il se montre encore pour sa position de stabilité qui est sur M s , et non plus sur A L ; ainsi, pour qu'une aiguille mobile autour de son centre, soit en équilibre en présence du courant, il faut que celui-ci soit placé quelque part sur le cercle ou sur la droite; s'il est sur le cercle, l'équilibre est indifférent; s'il est sur la droite, l'équilibre est stable, depuis l'infini jusqu'à l'entrée du cercle en s , instable

sur toute la longueur du rayon $s M$, stable sur la rayon $M s'$, et instable enfin depuis S jusqu'à l'infini.

Deuxième cas. L'axe de rotation est entre l'un des pôles et le milieu de l'aiguille.

$$\text{Alors} \quad X > \frac{\lambda}{a} \text{ et } < \lambda.$$

Quand l'axe de rotation est placé entre le milieu de l'aiguille et l'un de ses pôles, le pôle boreal, par exemple, il y a encore deux courbes limites, qui sont l'une et l'autre symétriques, par rapport à l'aiguille. La première est indéfinie dans le sens des y et très resserrée dans le sens des x ; la seconde est fermée dans tous les sens, et la distance entre l'axe et le pôle boreal est l'axe de s d'un mètre. Il y a ici une remarque curieuse; c'est qu'autour du pôle boreal il se trouve un petit espace où toutes les actions semblent contraires.

Après avoir tracé les courbes, il est facile de discuter, comme dans le cas précédent, les positions de stabilité ou d'instabilité, et de déterminer les intensités des forces pour toutes les positions.

Troisième cas. L'axe de rotation est au pôle boreal de l'aiguille.

$$\text{Alors} \quad X = \lambda.$$

Dans ce cas, les deux courbes précédentes se réduisent, l'une à l'axe des y , et l'autre à un point unique, qui est le pôle boreal ou le point fixe lui-même, fig. 376. Il faut donc, pour que l'équilibre ait lieu, que le courant soit placé quelque part sur la ligne $Y Y'$ ou au point B. On pouvait le prévoir d'ailleurs, car la force du pôle boreal étant toujours détruite, et celle du pôle austral restant seule pour imprimer du mouvement à l'aiguille, il faut bien qu'elle soit dirigée suivant sa longueur pour la laisser en repos, et par conséquent que le courant soit placé sur la perpendiculaire, menée par le pôle austral.

Si on la place ailleurs, l'aiguille est obligée d'abandonner sa position d'équilibre, en tournant autour de son axe. Pour savoir où elle doit s'arrêter, on trace le cercle qu'elle décrirait par une révolution complète, et, par le courant, on mène les tangentes à ce cercle; les deux points de tangence sont les points où doit être le pôle austral pour l'équilibre; au point qui est à gauche l'équilibre est stable, et il est instable au point qui est à droite. Les phénomènes se passent autrement quand la courant est dans l'intérieur du cercle: il attire ou repousse l'aiguille, suivant sa situation; dans le premier cas, elle errera au contact par le plus court chemin, et s'y arrête; dans le second cas, elle tourne pour s'éloigner; mais ne trouvant sur toute la circonférence un seul point de repos, elle le décrit tout entière, et se retrouve ainsi en contact avec le courant par le côté opposé, et se presse contre lui parce qu'il y a attraction.

La matière du fil qui soit le support est donc la seule cause qui puisse, dans ce cas, arrêter l'aiguille et l'empêcher de tourner indéfiniment; ainsi, un courant immatériel, comme celui qui traverse le vide, imprimerait à l'aiguille suspendue de cette manière un mouvement de rotation perpétuel: il y a même un point unique où le courant ordinaire produirait le même effet; c'est en pôle boreal, par lequel passe l'axe de rotation.

Quatrième cas. L'axe de rotation est au delà du pôle boreal.

$$\text{Alors} \quad X > \lambda.$$

L'équation représente encore deux courbes comme dans le deuxième cas, l'une indéfinie et l'autre fermée: il y a seulement cette différence que les courbes sont renversées; la première s'est tournée du côté des x négatives, et la seconde a passé au delà du pôle boreal, du

telle sorte que la distance entre ce pôle et l'axe de rotation forme son grand diamètre.

Cinquième cas. L'axe de rotation est plutôt à une distance infinie.

Alors, $X = \infty$.

L'équation est celle d'une hyperbole équilatère, dont l'axe est l'aiguille elle-même; ainsi, quand on place la courbure sur un point de l'hyperbole, soit sur une courbe soit sur l'autre, il n'exerce aucune action pour faire tourner l'aiguille.

Si on le place dans l'intérieur de la courbe, il y a rotation, et pour savoir dans quel sens elle se fait, il suffit de prendre la différence des forces qui agissent perpendiculairement à l'aiguille, aux deux pôles A et B.

412. *Multiplicateur de Schweiger.* — Peu de temps après la découverte de M. Ørsted, M. Schweiger imagina le *galvanomètre*, que l'on appelle aussi *multiplicateur*, parce qu'il multiplie en effet la force électro-magnétique, et qu'il est d'une sensibilité merveilleuse pour découvrir les moindres traces de l'électricité en mouvement. Le multiplicateur repose sur ce principe, qu'un courant circulaire ou polygonal, on ayant en général une forme rentrante quelconque, agit par toutes ses parties pour diriger, dans le même sens, une aiguille aimantée qu'il enveloppe de toutes parts. Par exemple, toutes les parties du courant qui parcourt les côtés du carré $pqrn$ (Fig. 381) agissent de la même manière sur une aiguille qui serait mobile autour du centre c de la figure, et qui pourrait se tourner perpendiculairement à son plan. Le côté $p q$ tend à tourner le pôle austral en avant de la figure, et le pôle horéal derrière; il en est de même du côté $q r$, du côté $n a$ et du côté $a n$: ainsi, l'aiguille devra se tourner avec beaucoup d'énergie perpendiculairement au plan du courant, le pôle austral en avant. Un deuxième circuit de même intensité, allant dans le même sens, produirait sur elle un effet égal; il en serait de même d'un troisième, d'un quatrième.... d'un centième: donc un fil conducteur enroulé sur lui-même et formant cent tours, doit, quand il est traversé par le même courant, produire un effet cent fois plus grand qu'un fil d'un seul tour: seulement, il faut que les fluides parcourent toutes les circonvolutions du fil sans passer latéralement d'un contour à l'autre; c'est une condition facile à remplir. On prend pour cela un fil d'argent ou de cuivre rouge de quinze ou vingt aunes de longueur, de quelque fraction de millimètres d'épaisseur, et revêtu d'un fil de soie dont les tours sont tellement serrés que l'on n'aperçoit plus le métal; on l'enroule sur un petit cadre en bois, $m n o p$ (Fig. 377), à peu près comme du fil sur une bobine; seulement, on laisse libre un ou deux pieds de longueur à chaque extrémité; c'est ce qu'on appelle les *deux fils du multiplicateur*; le courant doit entrer par l'un et sortir par l'autre: ces deux fils sont représentés dans la figure par $f g$ et $i g'$; l'aiguille aimantée ab , qui doit servir d'index, est suspendue à un fil de cocon s , et tout l'appareil est recouvert

d'une cloche $m m'$ qui le garantit des agitations de l'air. Lorsqu'on veut faire une expérience en tournant le cadre dans la direction du méridien magnétique: l'aiguille est alors dans le plan du cadre, et l'effet du courant la dévie de cette position d'un angle plus ou moins grand, suivant qu'il est plus ou moins énergique; dans cette position la force électro-magnétique est combattue par la force magnétique de la terre, qui agit incessamment sur l'aiguille, pour la ramener dans le méridien magnétique.

Pour donner au multiplicateur toute la sensibilité dont il est susceptible, il faut trouver le moyen d'augmenter la force électro-magnétique, et de diminuer la force directrice de la terre, sans toutefois la détruire; car si l'aiguille était soumise à la seule action du courant, les forces les plus faibles, comme les plus énergiques, l'amèneraient toujours dans la même position, et l'on n'aurait plus aucun moyen de faire la comparaison des intensités.

La force directrice de la terre peut être diminuée en diminuant l'énergie de l'aiguille aimantée; mais alors la force électro-magnétique serait elle-même diminuée dans le même rapport, puisqu'elle résulte de l'action mutuelle du courant et de l'aiguille. Au contraire, si l'on suspend les deux aiguilles à pôles opposés ab et $o' b'$, l'une dans l'intérieur du cadre et l'autre en dehors, soit au-dessus, soit au-dessous, la force directrice de la terre sera diminuée à volonté, ou même exactement neutralisée, et en même temps la force électro-magnétique sera augmentée, car le courant agit sur ces deux aiguilles pour les tourner dans le même sens. Deux aiguilles dans le cadre, et deux au dehors, donneront encore un effet plus sensible, puisqu'on pourra, par leur moyen, d'une part, réduire ou compenser exactement la force directrice de la terre, et, de l'autre, faire agir le courant toujours dans le même sens sur une quantité de magnétisme libre beaucoup plus grande. C'est cette dernière disposition qui est représentée dans la figure 377, dessinée d'après l'appareil excessivement sensible de M. Lebaillif.

Les quatre aiguilles sont plantées perpendiculairement dans un petit brin de paille, qui est lui-même attaché au fil de cocon; puisqu'elles se meuvent ensemble, il suffit d'un seul cercle divisé pour observer leur déviation commune; ce cercle doit être adapté près de l'aiguille supérieure.

La même figure représente encore un autre perfectionnement très utile; au lieu d'un fil ayant, par exemple, 300 pieds de longueur, on emploie cinq fils parallèles, ayant chacun 60 pieds; à chaque extrémité ces fils sont dépouillés de la soie qui les couvre, réunis en un petit faisceau et pressés l'un contre l'autre dans une assez grande longueur. De cette manière, le courant qui se présente pour traverser le multiplicateur se divise en cinq parties, et coule pour ainsi dire par cinq canaux; il semble, au premier coup d'œil, qu'en supprimant l'un de ces fils, la portion du fluide qui le traversait va se

reposer sur les quatre fils restans, et qu'on obtiendra le même effet, mais il n'en est pas ainsi : une source électrique étant donnée, un fil de métal ne peut l'épuiser, la quantité de fluide qui le traverse est sensiblement proportionnelle à sa section, et deux fils pareils laissent passer sensiblement deux fois autant de fluide qu'un seul : par conséquent, si l'on supprimait l'un des cinq fils du multiplicateur, on perdrait à peu près la cinquième partie de l'effet. D'un autre part, la conductibilité est, comme nous le verrons plus loin, à peu près en raison inverse de la longueur des fils ; ainsi, en augmentant le nombre des tours du même fil, on se donne à la vérité un plus grand nombre de forces qui agissent sur l'aiguille, mais chacune d'elles devient plus petite, tellement que, si la conductibilité était rigoureusement en raison inverse de la longueur, le multiplicateur ne multiplierait pas, puisque, deux tours d'un même fil exigeant une longueur double, la force réelle du courant serait réduite à moitié, et l'on aurait 2 forces égales à $1/2$, au lieu d'une force égale à 1 ; on n'y gagnerait rien.

Le multiplicateur est un instrument sûr et commode pour constater le développement de l'électricité par le contact des corps, et même pour déterminer l'espèce d'électricité qui appartient à chacun d'eux.

Par exemple, pour voir l'électricité qui se développe au contact du zinc et du cuivre, on adapte un petit disque du zinc à l'un des fils, et à l'autre un disque de cuivre pareil ; sur l'un de ces disques on met une rondelle de papier mouillé d'eau pure, et ensuite on les approche en les pressant l'un et l'autre contre la rondelle ; à l'instant l'aiguille du multiplicateur est vivement agitée, elle pourrait même décrire plusieurs circonférences avant de s'arrêter, tant est énergique l'action qu'elle éprouve. Ce n'est pas au contact des disques que se développe l'électricité, puisqu'ils sont séparés par la rondelle mouillée, mais c'est au contact du zinc avec le fil de cuivre. Pour reconnaître que le zinc prend la vitrée, et le cuivre la résineuse, il suffit de remarquer que le courant qui traverse le multiplicateur entre en effet par l'extrémité du fil à laquelle est adapté le disque de cuivre.

En substituant au disque de zinc un disque d'un autre métal quelconque, on reconnaîtra de la même manière l'espèce d'électricité qu'il développe par son contact avec le fil de cuivre.

Pour déterminer les électricités qui se développent au contact de deux autres substances quelconques, par exemple, du zinc et de l'argent, il faut prendre une précaution de plus : il faut alors mettre du zinc à l'une et à l'autre extrémité du fil, placer la rondelle mouillée sur l'un de ces zincs, la lame d'argent sur la rondelle mouillée, et enfin l'autre zinc sur la lame d'argent ; puis observer le sens de la déviation de l'aiguille, pour distinguer le métal

qui est positif et celui qui est négatif. Le tableau suivant contient l'ordre des tendances électriques que j'ai observées, par cette méthode, dans différens corps ; chacun est électro-positif avec tous les suivans, et électro-négatif avec tous les précédens.

1 { Zinc,	17 Bismuth,
2 { Mercure,	18 Laiton,
3 { Zinc,	19 Cuivre,
4 { Étain,	20 Bronze,
5 { Mercure,	21 Sulfure d'antimoine,
6 { Zinc,	22 Métal de cloches,
7 { Plomb 1,	23 Arsenic,
8 { Mercure 4,	24 { Antimoine 1,
9 { Alliage de d'Arcet,	25 { Cuivre 2,
10 { Soudure,	26 { Étain 1,
11 { Plomb,	27 { Antimoine,
12 { Étain 1,	28 { Mercure,
13 { Mercure 10,	29 { Sulfure de bismuth,
14 { Bismuth 1,	30 { Phosphore de cuivre,
15 { Étain 20,	31 { Antimoine,
16 { Plomb,	32 { Plombagine,
17 { Caractères d'imprim.	33 { Sulfure de cuivre,
18 { Fer,	34 { Sulfure de plomb,
19 { Acier,	35 { Phosphore de fer,
20 { Antimoine 1,	36 { Argent,
21 { Fer 2,	37 { Or,
22 { Bismuth 1,	38 { Tellure,
23 { Mercure 4,	39 { Palladium,
24 { Antimoine pur,	40 { Platine.

Il arrive souvent que la tension électrique, produite par l'action chimique d'un conducteur humide sur un métal, est plus forte que celle qui est produite par le contact de ce métal avec un autre. Ainsi l'acide sulfurique étendu et l'acide nitrique donnent plus de tension lorsqu'ils agissent sur le zinc, que ce métal n'en donne quand il touche le plomb, l'argent et plusieurs autres conducteurs. L'acide nitrique avec l'étain en donne plus aussi que l'étain avec le plomb ; les alcalis en donnent plus avec l'antimoine, que l'antimoine avec un grand nombre d'autres corps, etc.

Il résulte de là que l'ordre précédent semble changer avec la nature du conducteur humide que l'on emploie ; car pour tel conducteur, c'est l'électricité développée au contact des métaux qui l'emporte, et qui détermine le sens du courant ; pour tel autre conducteur, au contraire, c'est l'électricité dégagée par son action sur un des métaux, qui devient prédominante et qui change la direction primitive. Ainsi, l'étain semble passer avant le plomb, quand le conducteur humide est l'acide sulfurique, ou l'acide hydrochlorique, ou la potasse. L'antimoine vient se placer avant l'acier quand le conducteur humide est un alcali ; et plusieurs autres corps de la série éprouvent des déplacements plus ou moins considérables, suivant la nature du conducteur que l'on emploie ; mais en déterminant,

autant qu'il est possible, dans des expériences aussi délicates, les rapports de tension qui existent entre les électricités produites par les actions chimiques et celles qui sont produites par les actions électromotrices ordinaires, on arrive à reconnaître, d'une manière assez sûre, que l'électricité développée au contact des métaux, est celle qui l'emporte, et qui agit sur l'aiguille. Ainsi, les tables précédentes ne présentent pas de grandes erreurs dans la série qu'il renferme.

Au reste, une très petite différence dans la composition d'un corps peut produire un effet sensible sur la place qu'il occupe : par exemple, l'antimoine pur ne diffère de l'antimoine du commerce que par une très petite quantité de soufre, et l'on voit cependant que ces deux corps sont à une distance assez grande.

Nous verrons plus tard que le multiplicateur est un instrument précieux pour reconnaître les électricités qui se développent dans la plupart des combinaisons chimiques.

413. *De l'aimantation par le courant de la pile et par les décharges électriques.* — Puisqu'une aiguille aimantée se tourne perpendiculairement à la direction du courant, il est naturel de supposer qu'une aiguille de fer ou d'acier prendra d'autant plus de magnétisme qu'elle sera plus rapprochée de cette position. En effet, on courant n'aimante que très faiblement les aiguilles qui lui sont parallèles, tandis qu'il aimante avec beaucoup de force, et souvent même à saturation, les aiguilles de substances magnétiques qui sont tournées en croix avec lui, comme elles se tourneraient si elles étaient préalablement aimantées. D'après ce principe, il est évident que pour développer, avec un courant donné, des quantités de magnétisme de plus en plus grandes, il faut le faire agir non-seulement sur le milieu de l'aiguille, mais encore sur toutes les sections transversales, et à des distances de plus en plus petites. Pour remplir ces conditions, l'on enroule un fil de métal en *hélice*, sur un tube de verre (Fig. 378), on place l'aiguille dans ce tube, et l'on fait passer le courant de l'une à l'autre extrémité du fil de l'hélice ; un seul instant suffit pour qu'il développe tout le magnétisme qu'il est capable de développer dans ces circonstances ; car, après un contact qui n'a que la durée de l'étincelle, l'aiguille disposée dans le tube perpendiculairement au plan du méridien magnétique, se trouve aimantée aussi fortement qu'après un contact de plusieurs minutes. La rapidité ou plutôt l'instantanéité avec laquelle le courant peut vaincre la résistance de la force coercitive est un phénomène très remarquable.

On distingue deux espèces d'hélices : l'hélice *dextrorsum* (Fig. 378), dans laquelle le fil s'enroule vers la droite ; et l'hélice *sinistrorsum* (Fig. 379), dans laquelle il s'enroule vers la gauche ; en supposant, toutefois, qu'on les tienne de la même manière ; mais pour en donner une idée plus juste,

il suffit de dire que le *tiro-bouchon* ordinaire et toutes les vis sont des hélices *dextrorsum*.

Dans l'hélice *dextrorsum*, le pôle boréal de l'aiguille est toujours à l'extrémité par laquelle entre le courant, ou bien à l'extrémité positive du fil ; et dans l'hélice *sinistrorsum* c'est, au contraire, le pôle austral de l'aiguille qui se trouve à l'extrémité positive.

Lorsqu'on fait, sur le même tube, plusieurs hélices contraires, à la suite l'une de l'autre (Fig. 379), l'aiguille offre alors, dans son magnétisme, un point conséquent à la jonction des deux hélices ; ainsi chacune d'elles agit encore comme si elle était seule.

Avec une hélice deux fois renversée (Fig. 380), on aurait deux points conséquents, et ainsi de suite. Si l'on faisait de la sorte une hélice à pas très petits, et composée alternativement d'un tour *dextrorsum* et d'un tour *sinistrorsum*, on produirait sur l'aiguille aimantée une distribution de magnétisme très singulière ; ou plutôt l'effet définitif serait tel, qu'elle semblerait avoir conservé son état naturel.

L'électricité de la machine électrique, en passant par le fil d'un multiplicateur pour se rendre dans le sol, ou pour se recomposer avec celle des coussins, ne produit que de faibles déviations sur l'aiguille. Avec un multiplicateur de cinq cents tours, M. Colladon a obtenu une déviation de 18°, au moyen d'une machine assez forte ; l'un des fils de l'appareil communiquait aux coussins, et l'autre, aiguillé en pointe, était maintenu à un décimètre de distance des conducteurs (*Ann. de Chimie*, t. xxxiii, pag. 62) ; en portant la pointe à deux décimètres, à 4, à 8 et à 10, la déviation devenait moindre, et se trouvait sensiblement en raison inverse de la distance. Dans une autre expérience, l'un des fils touchant aux conducteurs positifs d'une machine de Nairne, et l'autre aux conducteurs négatifs, la déviation fut de 35°, pour trois tours de manivelle par seconde ; elle paraissait sensiblement proportionnelle à la vitesse de rotation.

M. Colladon a encore observé des effets analogues, en déchargeant *lentement* des batteries plus ou moins fortes au travers du multiplicateur ; la rapidité de la décharge dépend ici, comme dans la machine, de la distance à laquelle on approche la pointe qui termine l'un des fils de l'appareil. Dans toutes ces expériences le courant allait, comme dans la pile, de l'électricité positive à la négative ; on pouvait juger de sa direction par le sens de la déviation de l'aiguille.

L'aimantation par l'électricité ordinaire donne naissance à plusieurs phénomènes curieux que nous allons examiner :

1°. Le courant *direct* que l'on obtient en faisant communiquer les conducteurs avec les coussins, ne produit que de très faibles effets, lorsqu'il passe simplement par un fil droit. Les aiguilles, même très fines, que l'on expose transversalement à une petite distance de ce fil, ne s'aimantent pas quand

le courant est continu, mais elles commencent à prendre des quantités sensibles de magnétisme, lorsqu'on fait passer le courant par petites étincelles; leur magnétisme augmente, quand les étincelles deviennent plus fortes et partent de plus loin; enfin l'action du courant de la machine, comme celle du courant de la pile, s'augmente au moyen des hélices; alors, de vives étincelles produisent beaucoup d'effet sur les aiguilles qui sont dans le tube de l'hélice, et même M. Ridolfi est parvenu, par ce moyen, à développer du magnétisme avec un courant continu.

2°. Les décharges des bouteilles de Leyde, et des batteries, ont une puissance magnétique considérable, soit qu'elles traversent des fils droits, soit qu'elles traversent des hélices, à pas plus ou moins serrés (Fig. 378, 379 et 380). D'abord on avait obtenu, par l'un et l'autre moyen, des résultats identiques à ceux que produit la pile : on avait trouvé que près des fils droits, les aiguilles transversales s'aimantent, le pôle austral à gauche; et que dans les tubes des hélices elles s'aimantent, le pôle austral à l'extrémité négative pour les hélices *dextrosum*, et à l'extrémité positive pour les hélices *sinistrorsum*. C'est en effet ce qui arrive assez souvent; mais M. Savary a découvert plusieurs phénomènes remarquables, qui semblent établir une différence fondamentale entre le courant continu de la pile et les *chocs électriques* des batteries (Ann. de Chimie, t. xxxiv).

Quand le choc est transmis par un fil droit, des aiguilles égales, parallèles, placées transversalement du même côté du fil et à des distances différentes, ne sont point aimantées dans le même sens. Les unes sont aimantées *positivement*, c'est-à-dire que leurs pôles sont disposés comme ceux d'une aiguille aimantée d'avance, qui serait libre de se mouvoir sous l'action d'un courant paisible et continu passant par le fil, tandis que les autres sont aimantées *négativement*, c'est-à-dire en sens contraire des premières. Voici, par exemple, le résultat d'une expérience : La décharge passe par un fil de platine de 1/4 de millimètre de diamètre, dont la longueur tendue en ligne droite est de 1 mètre. Les aiguilles, trempées raides, ont 1/4 de millimètre de diamètre, et 15 millimètres de longueur; elles sont au nombre de 27, placées du même côté du fil, loin de ses extrémités, et perpendiculaires à sa longueur, de manière que les verticales de leurs centres tombent sur sa direction; en même temps elles sont dans des plans verticaux différens, afin que l'on puisse établir entre elles des distances assez grandes pour de très petites différences de distance au fil.

Numéros des aiguilles.	Distance au fil.	Durée de 60 oscillations.	Sens de l'aiman- tation.
1 . .	0,0mm . .	1'. 3" . .	+
2 . .	1,1	2. 29 . . .	—
3 . .	2,0	sans aimantation.	

4 . .	3,0	1. 26 . . .	+
5 . .	4,3	1. 6	+
6 . .	5,5	1. 3	+
7 . .	6,7	1. 14 . . .	+
8 . .	8,0	1. 32 . . .	+
9 . .	8,6	3. 8	—
10 . .	9,6	1. 35 . . .	—
11 . .	10,5	1. 17 . . .	—
12 . .	12,3	1. 1	—
13 . .	13,5	50	—
14 . .	14,6	56	—
15 . .	15,7	59	—
16 . .	16,9	1. 3	—
17 . .	18,2	1. 5	—
18 . .	19,1	1. 17 . . .	—
19 . .	20,0	1. 34 . . .	—
20 . .	20,9	2. 29 . . .	—
21 . .	21,4	presque nulle.	
22 . .	23,3	1. 24 . . .	+
23 . .	32,7	41	+
24 . .	44,0	34	+
25 . .	70,0	43	+
26 . .	100,0	1. 12 . . .	+
27 . .	180,0	1. 28 . . .	+

La décharge était faible; les aiguilles aimantées à saturation par de forts barreaux, faisaient 60 oscillations en 23"; ainsi la vingt-quatrième qui a reçu la plus forte charge magnétique, était loin encore de son maximum.

M. Savary a reconnu que ces alternatives, et les distances auxquelles elles se manifestent, dépendent, pour ainsi dire, de tous les éléments qui concourent au phénomène; savoir, de l'intensité de la décharge, de la longueur du fil tendu en ligne droite, de son diamètre, de l'épaisseur des aiguilles, et de leur force coercitive. En général, les fils très fins, et les forces coercitives très faibles, présentent des alternatives moins nombreuses; souvent même avec ces conditions l'aimantation est toujours positive, et les périodes ne sont plus marquées que par des différences d'intensité.

Quand le choc est transmis par des fils *roulés en hélice*, sur des tubes de verre ou de bois, il exerce encore des effets analogues sur des aiguilles successivement placées dans l'axe des tubes. Alors la seule variation d'intensité dans la charge de la batterie peut avoir une grande influence. Par exemple, un fil de laiton de 0^m,18 de diamètre, et de 0^m,8 de longueur, ayant été roulé en hélice sur un cylindre de bois sec de 6^m,5 de diamètre, et de 90^m de longueur, le pas de l'hélice ayant 3 millimètres, on a fait passer quatorze décharges d'intensités toujours croissantes sur quatorze aiguilles pareilles, de 15 millimètres de longueur, et de 1/4 de millimètre d'épaisseur, placées successivement dans l'axe du cylindre, et les résultats ont été les suivans : les signes + et — indiquent, comme précédemment, le sens de l'aimantation; le temps marqué dans la colonne est la durée de 60 oscilla-

tions; la première aiguille est celle qui a reçu le premier choc, la deuxième, celle qui a reçu le deuxième, etc.

Première. . . + 26"	Huitième. . . — 33"
Deuxième. . . + 57	Neuvième. . . — 68
Troisième. . . — 38	Dixième. . . + 28
Quatrième. . . — 25	Onzième. . . + 23
Cinquième. . . + 29	Douzième. . . + 35
Sixième. . . + 27	Treizième. . . — 1' 15
Septième. . . — 42	Quatorzième. + 31

En général, pour des fils plus longs, et pour des fils plus minces, le nombre des alternatives diminue : un fil d'argent de 1/40 millimètre de diamètre, et de 0^m,25 de longueur, formant pareillement une hélice dont le pas est de 3 millimètres, ne donne plus d'alternatives, depuis les plus faibles charges, jusqu'à celles qui sont capables de le vaporiser; dans ce dernier cas, les aiguilles sont encore aimantées, et même jusqu'au point de saturation.

Efn M. Savary a constaté, par de nombreuses expériences, un autre phénomène qui me semble mériter toute l'attention des physiciens. La quantité de magnétisme que prend une aiguille sous l'influence d'une décharge électrique, et même le sens de son aimantation, dépendent de la nature et des dimensions des corps qui la touchent ou qui l'enveloppent. Dans une hélice pareille aux précédentes, et traversée par une décharge électrique, une aiguille se peut plus prendre de magnétisme quand elle est enveloppée d'un cylindre de cuivre assez épais : à mesure que l'épaisseur diminue, le magnétisme devient sensible, et pour une épaisseur assez petite il devient plus considérable qu'il ne serait pour une aiguille nue et isolée dans l'axe de l'hélice. L'étain, le fer et l'argent placés autour de l'aiguille, lui donnent des propriétés analogues, c'est-à-dire, qu'en feuilles très minces, ils la rendent plus apte à recevoir le magnétisme, et qu'en cylindres suffisamment épais, ils lui ôtent tout-à-fait la propriété d'être aimantée par le choc électrique. Des cylindres de limaille métallique ne produisent pas cet effet, tandis que des couches concentriques, alternativement métalliques et non métalliques, le produisent; d'où il semble résulter que les solutions de continuité perpendiculaires à l'axe de l'aiguille, ou à l'axe des cylindres, ont une grande influence sur leurs propriétés.

Des plaques plus ou moins épaisses, mises en contact avec une aiguille qui est disposée convenablement près d'un fil droit, pour recevoir l'influence d'une décharge, peuvent aussi, suivant leurs dimensions, modifier la quantité de magnétisme que prend cette aiguille, et le sens de son aimantation.

Tous ces phénomènes paraissent dépendre de l'action subite que le choc électrique produit, soit directement sur les molécules qu'il rencontre, soit

latéralement sur les molécules qui sont éloignées de son cours.

414. *De la rotation des aimans par l'influence des courans.* — Le phénomène curieux de la rotation des aimans par l'action des courans a été indiqué par le Dr Wollaston et démontré par M. Faraday, à une époque où l'on n'avait encore que des notions très incomplètes sur les forces électro-magnétiques (*On electro-magnetical motions and the theory of magnetism*, septembre 1821). Maintenant toutes les particularités de ces mouvemens peuvent être présentées comme des conséquences du principe général dont nous avons essayé de donner une idée (411).

Voici d'abord le détail des expériences : une large éprouvette en verre *ee'* (Fig. 397) est remplie de mercure jusqu'à une petite distance de ses bords; un aimant cylindrique *a*, lesté avec un contre-poids de platine *r*, se tient debout dans le mercure, de manière que son pôle *a* s'élève de quelques millimètres au-dessus du niveau (cet aimant est représenté un peu plus en grand dans la figure 393); une tige *t*, que l'on peut élever ou baisser à volonté au moyen d'une vis de pression, vient plonger dans le mercure par son extrémité inférieure, tandis qu'elle communique par son autre extrémité avec un conducteur en cuivre *c* qui communique lui-même avec l'un des pôles de la pile; enfin le conducteur *c'* qui tient à l'autre pôle, passe sur le bord de l'éprouvette et plonge dans le mercure très près de son contour extérieur. Dès que la communication est établie, l'aimant tourne dans le même sens d'un mouvement plus ou moins rapide et fait des révolutions successivement autour de la tige *t*; il a bien quelque tendance à venir la toucher et à tourner alors plus rapidement; mais, avec quelques soins, il est facile de l'ajuster pour qu'il se maintienne à distance. La figure 391 représente une coupe horizontale, ou plutôt une vue de la surface du mercure : *e* est la section du courant, *a* celle de l'aimant, et *a*, *a'*, *a''* la circonférence qu'il décrit dans ses révolutions; les flèches indiquent le sens du mouvement, en supposant que le pôle austral soit en haut et que le courant monte par la tige.

La longueur de l'aimant étant de 7 à 8 lignes, il est évident que le pôle inférieur *a* n'éprouve qu'une action insensible, soit de la part du courant vertical qui traverse la tige *t*, soit de la part du courant à peu près horizontal qui glisse sur la surface du mercure. Ainsi la cause du mouvement se trouve dans le pôle *a*. Les deux courans dont nous venons de parler le sollicitent diversement : celui qui passe par la tige, et que nous supposons ascendant, agit sans cesse pour le pousser à gauche, et détermine ainsi le mouvement de rotation que l'on observe; celui qui passe sur le mercure agit aussi pour favoriser ce mouvement quand le pôle *a* se trouve dans la demi-circonférence *a''* *a* (Fig. 391), et pour le diminuer quand il se trouve dans la demi-circonférence opposée; mais ses effets sont très

faibles et suffisent à peine pour modifier la vitesse de rotation. Quand on change la direction du courant, le mouvement s'arrête et recommence bientôt en sens inverse, et quand on change les pôles de l'aimant, on observe aussi sur le pôle boréal des mouvements contraires à ceux que donne le pôle austral.

Le mercure offre une si grande résistance, qu'il faut un puissant appareil et un aimant très fort, sous un petit volume, pour produire un mouvement de rotation régulier et un peu rapide. Mais on peut disposer l'expérience d'une autre manière, qui donne toujours une grande vitesse, même avec des piles ordinaires de 10 à 12 couples. Cette disposition est représentée dans la figure 398. La petite cavité qui se trouve à l'extrémité de l'aimant, et par laquelle il peut se vider sur le contre-poids en platine, forme une espèce de petite coupe g (Fig. 393), que l'on remplit de mercure; on abaisse la pointe de la tige t de manière qu'elle plonge dans ce mercure sans toucher à l'aimant, qui conserve ainsi toute sa mobilité; ensuite on établit les communications avec les deux pôles de la pile comme dans l'expérience précédente. Le courant arrive, par exemple, dans la coupe r' , monte par la lame de cuivre l' , traverse le conducteur c' , passe dans le mercure, monte par l'aimant lui-même, de là dans la tige, et s'en va, par le conducteur c , par la lame de cuivre l , se rendre dans la coupe négative r . Alors l'aimant tourne sur lui-même comme une tonpie, avec une grande vélocité. La figure 393 représente une coupe de l'appareil faite sur la surface du mercure, et les flèches indiquent le sens de la rotation en supposant que le courant soit ascendant et que le pôle austral de l'aimant soit en haut. En retournant les pôles ou en changeant la direction du courant on obtient des mouvements contraires.

L'explication de ce phénomène repose encore sur les mêmes principes; le courant qui monte par l'aimant exerce sur son pôle supérieur des actions qui se détruisent; mais les actions réciproques que le pôle exerce sur les diverses parties du courant donnent naissance à autant de forces qui agissent dans le même sens pour faire tourner le système. En d'autres termes, les phénomènes se passent comme si le courant, au lieu de traverser la substance de l'aimant, traversait une coque conductrice isolée qui l'enveloppât de toutes parts. En effet, je me suis assuré que, si l'on entoure l'aimant d'une substance non conductrice pour le mettre ensuite dans une sorte d'étui en cuivre mince, et qu'on répète l'expérience précédente, on obtient exactement les mêmes résultats. Or, dans cette nouvelle disposition, le courant étant de toutes parts symétrique autour du pôle de l'aimant, il est clair que la somme des actions qu'il exerce sur lui se détruisent comme étant opposées deux à deux et appliquées au même point, tandis que la réaction du pôle sur chaque fillet vertical du courant donne des forces opposées deux à deux,

dont les effets s'ajoutent pour faire tourner dans le même sens, parce que ces forces sont appliquées à la circonférence au lieu d'être appliquées au centre.

On avait supposé d'abord que les portions du courant qui passent sur le mercure étaient la cause de la rotation de l'aimant; mais voici des expériences par lesquelles je me suis assuré que ces courants n'entrent pour rien dans le phénomène.

La première consiste à percer la tige t dans toute sa longueur, ensuite on fixe, avec de la cire, un fil de soie au fond de la cavité de l'aimant, on le fait passer par l'ouverture centrale de la tige, et on l'attache à quelque point fixe en lui donnant une longueur convenable (voyez en F, Fig. 393). L'aimant ainsi suspendu, on fait passer autour de lui un anneau qui ne le touche pas tout-à-fait, mais qui en approche assez près pour qu'une goutte de mercure reste dans l'intervalle, adhérente d'un côté au contour de l'anneau, et de l'autre à la surface de l'aimant. Alors, en faisant communiquer l'anneau à l'un des pôles de la pile, au pôle positif, par exemple, le courant passe dans la goutte de mercure, monte dans l'aimant, arrive à la tige et de là se rend au pôle négatif. Cette disposition offre l'avantage de faire passer le courant par telle partie de l'aimant que l'on juge convenable; car on peut faire monter ou descendre l'anneau dans toute sa longueur, et l'on observe ainsi que l'effet maximum est produit quand l'anneau est au milieu à égale distance des pôles, qu'il est nul quand l'anneau est tout-à-fait en bas, et nul encore un peu avant qu'il soit arrivé tout en haut.

La seconde expérience est représentée dans la figure 396. A B est un aimant cylindrique enveloppé d'une feuille de papier ou d'une coque de vernis non conductrice; il est enfoncé dans un étui en cuivre très mince ce' , qui porte en son milieu une espèce de volant ce' , et à ses extrémités des bouchons bb' dans l'axe desquels sont fixés des tourillons en acier ff' ; ces tourillons reposent sur le tranchant de deux lames de métal mm' , ajustées pour recevoir en même temps quelques gouttes de mercure, afin de mieux établir les communications. Le bord du volant plonge aussi dans le mercure qui contient la coupe c . L'un des pôles de la pile communiquant à la lame m' , et l'autre à la coupe, le courant s'établit; il passe dans le tourillon f' , dans la partie c' de l'étui de cuivre, dans le volant, dans la coupe, et de là à l'autre pôle de la pile. Alors l'aimant prend un mouvement de rotation très rapide, qui change de direction quand on fait passer le courant en sens contraire.

Dans cette expérience, le système prend encore son mouvement par la réaction que le pôle exerce sur le courant qui traverse l'étui de cuivre. Cependant je dois ajouter que M. Ampère explique ces phénomènes d'une autre manière, au moyen d'une théorie mathématique, dont nous verrons les principes dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II.

DE L'ACTION DE LA TERRE ET DES AIRANS SUR LES COURANS.

415. *Direction des courans par l'influence du magnétisme de la terre.* — Quand on eut constaté l'action des courans sur les aimans, on ne pouvait pas douter qu'il n'y eût, de la part des aimans, une réaction capable de diriger les courans et de les mouvoir de diverses manières. Entre tous ces phénomènes inverses des précédens, ceux qui devaient résulter de l'action magnétique de la terre se présentaient comme les plus curieux à examiner, et l'on essaya en effet de disposer des courans mobiles pour étudier les modifications qu'ils éprouveraient en les abandonnant comme des boussoles à l'influence du magnétisme terrestre. Ces premiers essais ne donnaient point de résultats satisfaisans, parce qu'il était difficile alors de donner un courant toute la mobilité désirable. Enfin, M. Ampère parvint à lever toutes ces difficultés par un mode ingénieux de suspension qui s'applique avec avantage à tous les courans mobiles. Il importe, avant d'aller plus loin, de donner une idée de cet ajustement.

La figure 416 représente deux colonnes verticales en cuivre, v et v' , fixées sur un pied en bois ll' ; à leur extrémité supérieure, elles se recourbent en *potence* et viennent se terminer par les deux coupes e , e' , dont les centres sont dans la même verticale; les parties de ces colonnes, qui semblent se toucher, sont séparées l'une de l'autre par des substances isolantes: ainsi, quand leur pied communique aux deux pôles de la pile par un moyen que nous allons indiquer, il est évident que les fluides électriques arrivent, l'un dans la coupe e , l'autre dans la coupe e' , et qu'il n'y a point de courant produit, à moins que l'on n'établisse une communication entre ces deux coupes, que l'on peut appeler l'une la *coupe positive*, et l'autre la *coupe négative*, suivant la nature du fluide qu'elles reçoivent.

Rien ne paraît plus simple que de faire arriver l'électricité au pied des colonnes; cependant, comme il est nécessaire de changer souvent les communications, de pouvoir instantanément les supprimer ou les établir dans un ordre inverse, sans rien déranger à l'appareil, M. Ampère a imaginé une disposition ingénieuse, qui remplit cet objet d'une manière très commode.

a et a' (Fig. 399) sont deux rainures de quelques lignes de profondeur, creusées dans l'épaisseur d'une plaque en bois (Fig. 399 bis) qui peut se poser sur les tables des divers appareils électro-

magnétiques; v et v' , t et t' sont quatre cavités, creusées de la même manière et communiquant diagonalement par deux lames de cuivre, savoir par ll' , qui va de e en e' , et par mm' , qui va de t en t' ; au point de croisement, ces lames sont séparées par une petite bande de substance non conductrice, afin que le courant ne puisse jamais passer de l'une à l'autre. Les deux rainures et les quatre cavités sont remplies de mercure; mais préalablement elles ont été mastiquées avec de la résine, afin que le courant ne puisse pas s'établir au travers du bois, plus ou moins poreux et plus ou moins humide, qui les sépare.

Cela posé, concevons que l'on plonge le fil positif de la pile dans la rainure a et le fil négatif dans la rainure a' ; il est évident que les fluides ne pourront passer ni dans l'une ni dans l'autre des quatre cavités v , v' , t , t' ; mais si l'on établit en même temps une communication de a à e , et une autre de a' à t , le fluide passera de a à v par la lame ll' ; et de t à t' par la lame mm' ; ainsi, la bande b' , qui communique à v' , sera positive, et la bande b , qui communique à t , sera négative. Au contraire, si, en reprenant les choses au premier état, on établit des communications de a à t , et de a' à e' , la bande b' sera négative, et la bande b positive: or, ces deux bandes étant destinées à produire le courant, lorsqu'en les fait communiquer ensemble par un circuit métallique quelconque, il est clair que le courant traversera le circuit dans un sens ou dans l'autre, suivant que l'on mettra deux arcs conducteurs de a à e et de a' à t , ou qu'en les mettra de a à t' et de a' à e' . Si maintenant on jette les yeux sur la pièce à bascule aa' (Fig. 399 bis), on verra bientôt tout le mécanisme dont il nous reste à parler. Cette pièce est en bois et peut tourner autour de l'axe oo' qui s'ajuste dans les trous oo' sur les pieds v et v' ; elle porte quatre arcs conducteurs en métal, deux d'un côté en e et e' , et deux autres pareils de l'autre côté en d et d' . Quand elle est en place, les extrémités de l'arc c répondent à la rainure a et à la cavité v , celles de d' à la rainure a' et à la cavité t' , celles de e' à a' et à t , celles de d à a et à e' ; leur longueur est telle que, dans cette position ils ne touchent point au mercure; mais quand on fait tourner la bascule pour plonger les arcs c et e' , le courant passe de b' à b , et quand on la fait tourner pour plonger les arcs d et d' , le courant passe en sens inverse de b à b' .

Cet ajustement pris dans son ensemble s'appelle une *bascule* ; il est établi au pied des deux colonnes v et v' de la *figure 416* ; seulement, nous avons enfoncé la pièce mobile, qui aurait empêché de voir les positions relatives des rainures et des cavités ; on voit que les bandes b et b' de la *figure 399* viennent aboutir chacune au pied de l'une des colonnes, et que c'est par elles que le fluide passe pour arriver aux coupes e et e' ; en faisant plonger la bascule dans un sens ou dans l'autre, on rend chacune des coupes alternativement positive et négative.

Revenons maintenant à la *figure 388*, qui présente un fil de cuivre courbé en cercle et destiné à devenir un courant circulaire mobile ; les extrémités de ce fil sont liées entre elles, mais séparées l'une de l'autre par une substance isolante ; elles sont recourbées en croise de telle manière qu'elles correspondent aux deux coupes e et e' de la *figure 416* ; enfin, elles portent deux pointes d'acier, l'une qui doit poser sur la lame du verre un peu creusée ; qui forme le fond des coupes ; l'autre, qui doit simplement plonger dans l'autre coupe. L'eau acidulée, ou plutôt le mercure dont on remplit les deux coupes, achève d'établir les communications, et l'on observe ainsi un courant circulaire doué d'une grande mobilité.

Cette disposition s'applique évidemment à une portion de courant de forme quelconque, que l'on veut rendre mobile autour d'un axe vertical, pourvu que l'on ait soin de compléter l'équilibre avec des contre-poids, quand cette portion de courant n'est pas symétrique de part et d'autre de l'axe de rotation.

Le cercle de la *figure 388* étant mis en place dans l'appareil de la *figure 416*, on fait passer le courant, et l'on voit à l'instant qu'il y a une force qui le sollicite ; il se tourne, il oscille, et enfin il se fixe dans une position déterminée, à laquelle il revient sans cesse lorsqu'on l'en écarte. Ensuite, lorsqu'en plongeant la bascule en sens contraire on change la direction du courant, le cercle fait une demi-révolution, vient osciller de l'autre côté et se fixe enfin dans une position diamétralement opposée. Dans les deux cas le plan d'équilibre où il s'arrête se trouve exactement perpendiculaire au plan du méridien magnétique.

Ce phénomène et les autres actions que la terre exerce sur les courants furent expliqués pour la première fois dans le mémoire que je présentai à l'Institut sur ce sujet (*Annales de Chimie*, tome XXI, page 77). M. Auguste de La Rive avait fait de son côté des recherches analogues, dont il donna connaissance très peu de temps après à la *société d'Histoire naturelle de Genève* (*Bibliothèque universelle*, tome XVI, page 21, et *Annales de Chimie*, tome XXI, page 24). Concevons d'abord le plan du cercle dans le méridien magnétique ; soit e et e' (figure 388) la direction de la force terrestre, tm , $t'm'$ les deux tangentes parallèles à e et e' . L'effet

magnétique de la terre doit être le même que celui d'un aimant, dont le pôle boréal serait placé très loin sur le prolongement e et e' ; ainsi, entre ce pôle et l'arc $t'df$, du cercle, il y a deux forces formant un couple, dont l'une tend à pousser le pôle boréal à droite, et l'autre l'arc du courant à gauche ; en vertu de celle-ci l'arc $t'df$ tend à passer derrière, et à venir s'arrêter dans un plan perpendiculaire au plan de la figure ; l'arc $t'df$ au contraire tend, par la même raison, à passer en avant du plan de la figure, et à venir s'arrêter dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique. Ces deux forces agiraient dans le même sens pour faire tourner le cercle autour du diamètre td' , et comme il ne peut tourner qu'autour du diamètre dd' , on voit que la force directrice est seulement égale à la différence des arcs $t'd'$ et $d't$, plus à la même différence des arcs $t'd$ et $d't'$. C'est là ce qui détermine en même temps la rotation et le sens dans lequel elle doit s'accomplir.

En renversant le courant, il est clair que la rotation doit se faire en sens contraire, et que la position d'équilibre doit être, comme on l'observe, diamétralement opposée.

Si l'appareil était placé directement sur le pôle boréal magnétique de la terre, la force directrice serait nulle, puisque les deux tangentes étant alors verticales, l'arc $t'd$ serait égal à l'arc $d't'$, et l'arc $t'd'$ à l'arc $d't$.

Au contraire, sur l'équateur magnétique, la force directrice est la plus grande possible, puisque, les tangentes étant alors horizontales, chacune des demi-circonférences tend à tourner en sens contraire.

Des circuits fermés, triangulaires, carrés, ou d'une autre figure quelconque, peuvent être mis en expérience sur le même appareil (*Fig. 416*), et c'est aussi par les mêmes principes que l'on détermine le sens et l'intensité de leur force directrice. Pour que l'action de la terre se neutralise par elle-même dans un lieu quelconque, il suffit d'ajuster les fils pour avoir, de part et d'autre de l'axe de rotation, des parties symétriques que le courant traverse dans le même sens ; par exemple, la *figure 387* représente un rectangle qui n'a aucune force directrice ; en effet, il est facile de voir en suivant la direction du courant sur la figure, qu'il y a toujours de part et d'autre de l'axe, des forces égales qui se détruisent mutuellement, puisqu'elles tendent à produire une rotation dans le même sens.

On peut étudier toutes les propriétés des courants rectilignes verticaux, au moyen de l'appareil qui est représenté dans la *figure 382* : il se compose de deux vases cylindriques en cuivre ; l'un supérieur, et l'autre inférieur d'un diamètre un peu plus grand. Ces vases sont percés en leur milieu d'une ouverture un peu large, paroiement cylindrique ; dans laquelle passe la tige t , qui se termine par la coupe c . La traverse Ah' est de substance non con-

ductrice; elle porte en son milieu une pointe par laquelle elle repose en équilibre sur le fond de la coupe *c*, remplie de mercure. Les fils *e* et *e'* attachés à la traverse, sont recourbés, pour plonger par une extrémité dans l'eau acidulée du vase supérieur, et par l'autre dans l'eau acidulée du vase inférieur. Une petite languette en métal, sondée sur le fond du premier, vient plonger dans le mercure de la coupe, pour établir une communication entre l'eau et la tige. Ainsi le courant qui entre par le vase inférieur passe dans l'eau acidulée, dans les fils verticaux, dans l'eau acidulée du vase supérieur, dans la languette, dans la coupe, et vient enfin descendre par la tige *t*.

Lorsqu'on relève l'extrémité inférieure ou supérieure de l'un des fils, pour le faire sortir de l'eau acidulée, de manière que le courant passe seulement par l'autre fil, le système se dirige et vient se placer dans le plan perpendiculaire au méridien magnétique: si le courant est ascendant, le fil qu'il traverse se place à l'occident, ou du moins s'il vient à l'orient, il n'y trouve qu'une position d'équilibre instable, dont la moindre force peut le déranger; c'est le contraire quand le courant est descendant.

On voit par cette raison que les deux fils pris ensemble, s'ils sont bien égaux, diamétralement opposés, placés à la même distance de l'axe, et traversés par des courants de même intensité, doivent former un système complètement indifférent à l'action de la terre, puisque, dans toutes les positions autour de l'axe, les deux fils sont alors sollicités par des forces parallèles, égales et dirigées dans le même sens, qui ne cessent pas de se faire équilibre. Mais il n'en est plus de même lorsque les deux fils ne sont pas diamétralement opposés, ou lorsqu'il existe entre eux quelque légère différence de diamètre, de forme, de longueur, de distance à l'axe, ou de faculté conductrice qui entraîne quelque inégalité dans les moments de rotation. On peut, en variant ces diverses circonstances, faire un grand nombre d'expériences intéressantes.

Des circuits de différentes formes, mobiles autour d'un axe plus ou moins oblique ou plus ou moins incliné à l'horizon, peuvent prendre aussi des positions d'équilibre stables ou instables, qui sont dans des rapports déterminés avec la direction de la force magnétique de la terre. La *Fig. 380* représente, par exemple, un courant qui se dirige perpendiculairement à l'aiguille d'inclinaison, quand l'axe horizontal, autour duquel il tourne, se trouve lui-même perpendiculaire au plan du méridien magnétique. En effet, les diverses portions latérales qui se trouvent alors dans le plan du méridien, n'éprouvent aucune action qui puisse les faire tourner ou les diriger; mais les portions horizontales *A* et *A'*, situées, la première du côté du midi, et la seconde du côté du nord, reçoivent dans nos climats toute l'action du pôle boréal

de la terre; il en résulte deux forces perpendiculaires à l'aiguille d'inclinaison, qui concourent à faire tourner l'appareil dans le même sens: celle qui agit sur la portion *A'* tend à la déprimer au-dessous de l'horizon, et celle qui agit sur la portion *A* tend au contraire à l'élever au-dessus; et ces forces égales ne se détruisent autour de l'axe *aa'* que quand elles sont parvenues à agir dans des directions opposées, c'est-à-dire, dans la perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison, qui pourrait se mouvoir autour du même axe *aa'*.

Pour construire cet appareil et pour le mettre en expérience, on plie un fil de cuivre à partir de l'extrémité *n*, en suivant exactement toutes les directions qui sont marquées par des flèches sur la figure; on met une petite bande de cuir ou de bois sec aux deux points de croisement, et on le pose ou équilibre par les deux extrémités *n* et *n'* à peu près comme l'aimant de la *Figure 396*, afin que le courant puisse entrer et sortir sans gêner le mouvement de rotation.

416. *Direction des courants par les aimans.* — Ce que nous venons de dire sur la direction que le magnétisme de la terre imprime aux courants mobiles, suffit pour indiquer la plupart des effets qui seront produits par l'action des aimans; mais comme la terre agit sans cesse, il faudra, pour ne pas compliquer les expériences, employer des appareils dans lesquels son influence se détruise d'elle-même. Par exemple, le double rectangle de la *figure 387* étant suspendu dans l'appareil de la *figure 416*, en verra qu'il reste en équilibre dans toutes les positions, et en approchant l'un des pôles d'un aimant, il sera facile de l'attirer, de le repousser et de lui imprimer des mouvements dans tous les sens. Lorsqu'on fait ces expériences, on est frappé d'abord des alternatives d'attraction et de répulsion qui se manifestent pour des positions de l'aimant très peu différentes; en portant l'un de ses pôles un peu plus à droite ou un peu plus à gauche, en l'approchant ou en l'éloignant d'une quantité très petite, on observe à l'instant un renversement dans l'action. Tous ces mouvements si divers et si compliqués en apparence, se déduisent du principe général que nous avons énoncé (411). Pour les expliquer, il suffit d'analyser les couples différens qui résultent de l'action de chaque pôle sur les diverses parties du courant, et d'observer en même temps la disposition de ses forces par rapport à l'axe de rotation, et les bras de leviers par lesquels elles agissent; c'est un problème qui n'est, pour ainsi dire, que l'inverse du problème général dont nous avons alors indiqué la solution.

On doit à M. de La Rive plusieurs expériences ingénieuses, par lesquelles il fait voir que des courants très faibles peuvent être dirigés par les aimans, ou même par l'action magnétique de la terre. Ces petits appareils sont des courants flottans, dont on peut varier la forme à volonté, nous

en avons représenté deux dans les figures 394 et 395. Dans un morceau de liège, destiné à flotter sur un large vase d'eau acidulée, on fait passer une petite feuille de zinc z , qui est soudée en z à un ruban ou à un fil de cuivre c ; après avoir décrit une circonférence dans la figure 394, et diverses circonvolutions dans la figure 395, ce fil de cuivre vient à son tour passer dans le liège, et plonger dans l'eau acidulée à une petite distance de la feuille de cuivre. Dès que l'appareil est sur l'eau, le courant s'établit dans la direction des flèches, et il est assez sensible pour être dirigé par la terre, et à plus forte raison pour être attiré en réponse par les aimans. Par exemple, lorsqu'on présente le pôle boréal d'un aimant au cercle de la figure 394, à une certaine distance, on le voit se tourner sur lui-même d'une certaine manière, puis s'avancer vers le pôle, s'engager dans l'aimant, arriver jusqu'au milieu, et là s'arrêter après diverses oscillations. Si on avance ou si on recule l'aimant, le cercle avance ou recule pour garder sa position, qui est en effet la seule, comme on peut le voir aisément, dans laquelle il se trouve en équilibre stable.

417. *Rotation des courans par l'action de la terre.* — L'appareil qui sert à démontrer la rotation des courans par l'action de la terre est représenté dans la figure 394; c'est l'appareil de la figure 382, dans lequel on a enlevé le vase supérieur; il reste le vase inférieur r , r' , dans lequel on met de l'eau acidulée, et la tige t avec sa coupe c sur laquelle on pose le rectangle de la figure 388. Le ruban de cuivre circulaire r' qui unit les extrémités inférieures des fils verticaux v à et v' à N sert seulement à les maintenir et à rendre les communications plus complètes.

Le rectangle étant posé en équilibre dans la coupe et les communications établies, on fait passer le courant, soit pour qu'il monte par les deux fils v à et v' à N et descende par la tige t , soit pour qu'il monte par la tige et descende par les fils; alors la partie mobile v' à N se met en mouvement et accomplit des révolutions successives dont la rapidité dépend de la force de la pile et de la conductibilité des liquides que contiennent les vases. Aussitôt qu'on change la direction du courant, le mouvement se ralentit, s'arrête, et recommence, en sens inverse, avec la même rapidité. C'est M. Ampère qui a fait le premier cette expérience curieuse du mouvement continu de rotation. Nous avons déjà montré que deux branches verticales, diamétralement opposées, comme v et v' , et traversées l'une et l'autre par des courans ascendans ou descendans, restent complètement indifférentes sous l'influence du magnétisme de la terre; ainsi le phénomène de rotation ne peut pas être produit, comme on l'avait supposé d'abord, par les forces qui s'exercent sur ces parties mobiles de l'appareil; les deux branches horizontales m à, m à sont les seules qui déterminent la rotation. Par exemple, quand le courant est ascendant dans

les branches verticales, il va de h en m et de h' en m' ; or, si nous supposons que h à h' soit dans le méridien magnétique, h au midi et h' au nord, l'effet du pôle boréal de la terre sur m à donne naissance à une force qui tend à faire passer m à en avant du plan de la figure; et son effet sur m à donne naissance à une force égale qui tend à faire passer m à derrière le même plan; ce sont ces deux forces qui déterminent le mouvement continu, et la direction dans laquelle il doit s'accomplir, car il est facile de voir que h à h' , arrivé dans la position perpendiculaire au plan du méridien magnétique, est encore sollicité dans le même sens, quoique avec une intensité un peu moindre.

C'est d'ailleurs ce qu'on peut vérifier directement au moyen du petit appareil qui est représenté dans la figure 390, comme je l'ai fait voir dans le Mémoire cité plus haut. Cet appareil ressemble au précédent; seulement la tige t est très courte et les branches verticales sont supprimées; il ne reste que les branches horizontales m à et m' à, et de petits appendices verticaux qui plongent dans l'eau acidulée. Les petites boules b et b' servent à équilibrer et à donner de la stabilité à l'équilibre. Dès que les communications sont établies, la rotation s'accomplit avec une grande vitesse. Il est évident qu'une seule des branches m à ou m' à tournerait pareillement, et c'est ce que l'on peut encore vérifier, en supprimant sur l'une d'elles la petite portion verticale qui plonge dans l'eau.

La vitesse de rotation augmente avec l'inclinaison: au pôle magnétique, elle serait la plus grande possible, tandis qu'à l'équateur magnétique, elle serait exactement nulle.

La figure 417 représente un autre appareil de M. Ampère, avec lequel on peut varier de diverses manières ces expériences de rotation.

h à et h' à sont deux vases en cuivre, de forme ongulière, séparés l'un de l'autre et incrustés sur un disque en bois; on les remplit de mercure ou d'eau acidulée.

m est la coupe moyenne; elle est soudée à une lame qui va se replier verticalement et porter la coupe centrale c .

d est la coupe de droite; elle communique au vase h à.

g est la coupe de gauche; elle communique au vase h' à.

aa' , petit ruban de cuivre formant un arc de cercle d'environ 90°, et de même rayon que le vase h à dans lequel il doit plonger.

bb' , petit arc de cercle pareil au précédent qui doit plonger dans le vase h' à.

Ces deux arcs sont joints par deux fils de cuivre en sautoir, qui se croisent et qui se touchent sur la pièce qui porte le pivot p ; mais, aux extrémités o' et b' , ces fils sont isolés et ne communiquent point aux arcs de cuivre.

Lorsque le pivot du sautoir repose sur la coupe centrale c , que l'arc oo' touche légèrement au mer-

cure de a à a' , et l'arc bb' au mercure de s à s' , on que ces arcs plongent dans l'eau acidulée, on fait passer le courant par la coupe de droite d , par exemple, et par la coupe moyenne m ; alors le courant va seulement de a en p et le sautoir tourne dans un sens ou dans l'autre, suivant la direction du courant.

Au contraire, si l'on fait passer le courant par la coupe de droite d et par la coupe de gauche g , le sautoir reste immobile, parce que les deux branches a et p à tendent toujours à tourner en sens contraire, quel que soit l'angle qu'elles fassent entre elles.

418. *Rotation des courans par les aimans.* — Avec le pôle d'un aimant convenablement disposé relativement au courant horizontal de la figure 390, on peut produire à volonté tous les phénomènes que produirait l'action magnétique de la terre dans tous les climats, depuis l'équateur jusqu'aux pôles.

1°. Le pôle boreal d'un barreau étant présenté au-dessous de l'appareil et agissant ainsi dans le même sens que le magnétisme terrestre, on observe une grande accélération de vitesse dans la rotation.

2°. Le même pôle étant au contraire présenté au-dessus de l'appareil, son action est inverse de celle de la terre, et l'on peut, en variant les distances, faire tour à tour prédominer la force de l'aimant ou celle du globe terrestre.

3°. Le pôle austral de l'aimant agit toujours en sens contraire du pôle boreal; et comme l'action de chacun des pôles détermine des rotations opposées, en passant au-dessus ou au-dessous du plan horizontal à A' , il est évident que, dans ce plan lui-même, l'action de chacun est exactement nulle. On peut ainsi faire avec cet appareil un grand nombre d'expériences, dont il sera facile d'expliquer toutes les particularités.

Les expériences que l'on peut faire avec les courans verticaux, ascendans ou descendans, de la figure 383, ne sont ni moins nombreuses, ni moins variées, ni moins faciles à expliquer. Par exemple, il est évident que les deux courans diamétralement opposés, qui forment un système indifférent sous l'influence du magnétisme terrestre, forment au contraire un système capable de recevoir un mouvement de rotation très rapide sous l'action de l'un des pôles d'un aimant. Concevons en effet le cylindre indéfini que décrivent en tournant les deux fils verticaux e , e' , et leurs prolongemens; lorsqu'un pôle austral sera placé quelque part dans l'intérieur de ce cylindre, soit au-dessus, soit au-dessous des courans, il produira partout une rotation continue dans un sens ou dans l'autre, suivant que le courant sera ascendant ou descendant. Un pôle boreal placé seul produira aussi le même phénomène, toujours en sens inverse, de telle sorte qu'on n'aurait plus de rotation si ces deux pôles contraires

agissaient en même temps dans des positions où leur énergie fût égale.

Placés au dehors du cylindre indéfini dont nous venons de parler, les pôles d'un aimant ne peuvent plus produire de rotation; mais ils impriment simplement une direction déterminée au système mobile.

Les appareils des figures 384 et 385 participent à la fois aux propriétés des branches horizontales et à celles des branches verticales, et ils éprouveront, de la part des aimans, des effets composés dont il sera facile de faire l'analyse.

On doit à M. Faraday un appareil très simple, au moyen duquel on produit aisément le phénomène de la rotation continue; il est représenté dans la figure 385. s à s' est un vase en zinc, percé en son milieu, et portant une petite traverse sur laquelle est soudée en s une tige de cuivre s c.

Dans la coupe qui termine cette tige, on met en équilibre l'appareil de la figure 383; le mercure de la coupe et l'eau acidulée du vase, dans laquelle plonge le ruban circulaire, complètent les communications, et le courant mobile se met à tourner rapidement sous l'influence des barreaux qui sont placés en λ au-dessous du vase. On peut même donner à cet appareil assez de sensibilité pour qu'il tourne sous l'influence de la terre.

Enfin, l'on doit à sir H. Davy trois expériences très remarquables sur les phénomènes que présentent les courans qui passent dans le mercure ou dans le vide.

Premièrement. On met au fond d'une soucoupe ou d'un large vase en verre une masse de mercure assez considérable, sur laquelle on verse une couche d'eau acidulée; les deux pôles d'une pile viennent plonger verticalement dans le mercure en deux points qui soient à peu près à égale distance du centre et de la circonférence; le courant une fois établi de cette manière, on n'observe aucun phénomène particulier; mais dès qu'on approche l'un des pôles d'un puissant aimant, le mercure semble d'abord agité et tournoyant, et bientôt après toute la masse se met en mouvement de rotation très rapide, autour de chaque fil, comme autour d'un axe; la direction de ces mouvemens est déterminée par celle du courant, par la position et par la nature du pôle magnétique qu'on lui présente. L'action est plus vive lorsqu'on fait agir deux pôles contraires d'un aimant, l'un au-dessus, l'autre au-dessous du mercure, et hors de l'espace qui est compris entre les fils.

Secondement. On fait passer, par le fond d'un large vase en verre, deux gros fils de cuivre enduits de cire, excepté à leur extrémité supérieure, et s'élevant perpendiculairement jusqu'à un pouce environ au-dessus du fond. Ces deux fils sont à trois lignes l'un de l'autre. Le vase étant rempli de mercure de manière que le niveau s'élève à une ou deux lignes au-dessus des fils, on fait passer

un courant très énergique. Alors on observe les phénomènes suivants : le mercure est fortement agité, sa surface au-dessus de chaque fil s'élève en forme de petits cônes d'où s'échappent de petites ondes dans toutes les directions; le seul point sans agitation paraît être celui de la rencontre de ces ondes, au centre du mercure, entre les deux fils. Ensuite, lorsqu'on approche graduellement au-dessus de ces cônes le pôle d'un barreau fortement aimanté, son sommet s'affaisse peu à peu, et enfin il retombe au niveau; et même, à une moindre distance, le barreau détermine une dépression du mercure et une espèce d'entonnoir mobile et tourbillonnant, dont le sommet descend presque jusqu'à l'extrémité du fil.

L'étain en fusion présente le même phénomène.

Troisièmement. Le courant qui passe dans le vide, et dont nous avons parlé précédemment (401), peut être agité, dirigé et mis en mouve-

ment par le pôle d'un aimant puissant. L'étincelle qui part des conducteurs de la machine semble avoir trop de vitesse et d'impétuosité pour obéir à l'action des aimans; ainsi, nous ne devons pas être étonnés que les éclairs qui sillonnent le ciel pendant les orages ne soient pas sensiblement dirigés par l'action magnétique de la terre; tandis que l'électricité plus diffuse qui se manifeste dans les hautes régions de l'atmosphère par une lumière moins éclatante et moins instantanée obéit à cette influence, et semble en recevoir, non pas son mouvement, mais sa direction et son arrangement. Nous verrons dans la Météorologie que cette expérience curieuse de sir H. Davy est une donnée fondamentale pour expliquer les causes et les apparences des aurores boréales. Mais il reste encore des recherches importantes à faire sur les phénomènes singuliers que présentent les courans lorsqu'ils traversent les fluides élastiques raréfiés ou les liquides conducteurs.

CHAPITRE III.

DE L'ACTION DES COURANS SUR LES COURANS.

419. *Découverte de l'attraction et de la répulsion des courans parallèles.* — Après la découverte de M. Ørsted, M. Ampère fut conduit par des vues théoriques particulières à essayer l'action des courans sur les courans, et il parvint bientôt à une série de phénomènes qui offrent un grand intérêt par leurs variétés, et un intérêt plus grand encore par les liaisons qu'ils établissent entre les fluides électriques et magnétiques.

L'appareil qui nous servira à exposer les recherches de M. Ampère est représenté dans la figure 420.

II, tablette en bois.

vv', deux colonnes verticales en cuivre, recourbées perpendiculairement et venant se joindre par un petit cylindre d'ivoire, qui est assés mauvais conducteur pour que le courant ne passe jamais directement d'une colonne à l'autre.

mm', deux coupes moyennes, c'est-à-dire se trouvant dans la verticale du milieu de l'appareil.

dd', deux coupes situées à droite.

gg', deux coupes pareilles situées à gauche.

m' s', petit cylindre en métal portant la coupe m' et se divisant en s', en deux branches qui vont donner naissance, l'une à la coupe supérieure de droite d, l'autre à la coupe inférieure de gauche g'.

ms, cylindre creux portant la coupe m; il semble envelopper la tige m' s'; mais il en est séparé, au moyen d'un tube de verre, et il se divise pareil-

lement en deux branches : l'une qui va donner naissance à la coupe inférieure de droite d', et l'autre à la coupe supérieure de gauche g.

l, languette ou lame de cuivre flexible communiquant à la colonne v, et pouvant plonger à volonté dans le mercure de la coupe m'.

l' languette pareille communiquant à la colonne v' et pouvant plonger à volonté dans le mercure de la coupe m.

Ainsi, le fluide qui se meut sur la colonne v' vient aboutir aux coupes g et d', et celui qui se meut sur la colonne v vient aboutir aux coupes d et g'.

s' bascule au moyen de laquelle on fait entrer le courant alternativement par la lame en cuivre m ou par la colonne v.

z bascule pareille, au moyen de laquelle on fait arriver le courant dans la bande b ou dans la bande b'.

o et o', deux ouvertures, ou petites cavités pleines de mercure, dans lesquelles viennent aboutir les bandes b et b'. Elles sont destinées à recevoir diverses pièces que le courant doit traverser; s'il entre dans ces pièces par o il en sort par o', et vice versa. Dans l'un et l'autre cas, il peut passer de là en a' ou en m, suivant que la bascule plonge dans un sens ou dans l'autre.

Après cette rapide description on pourra comprendre facilement les expériences par lesquelles

nous allons démontrer, 1^o que les courans parallèles qui vont dans le même sens s'attirent, et 2^o que les courans parallèles qui vont en sens contraire se repoussent.

1^o. Dans les coupes g et g' on suspend en équilibre le rectangle de la figure 387, sur lequel la terre ne peut exercer aucune action; et dans les ouvertures e et e' on pose le rectangle de la figure 418. Les dimensions de ces rectangles sont tellement combinées que les côtés latéraux du premier ne puissent pas, dans leur révolution, passer au-delà de la verticale des coupes mm' ; et que le côté latéral du second, le seul qui doive agir, se trouve à peu près dans cette verticale.

Les choses étant ainsi disposées, on fait passer le courant en le faisant, par exemple, monter par la colonne v ; il arrive successivement en l , en m' , dans la coupe g' , passe dans le rectangle suspendu où il se trouve ascendant, suivant les deux côtés latéraux extrêmes, et descendant par les deux côtés du milieu (ce mouvement est contraire au mouvement qui est désigné par les flèches de la figure 387), et revient ainsi dans la coupe g ; de là il passe en m et en l pour aller descendre par la colonne v' et arriver par n' à la bascule s ; cette bascule penche en avant, le courant entre par la bande b , passe dans la cavité a , prend le côté vertical du rectangle fixe (Fig. 415), monte, traverse, descend et revient par le côté horizontal inférieur a' qui plonge dans la cavité e' ; de là il passe en b' , en n , et à la bascule a , dans laquelle il achève son circuit. Alors la branche verticale a du rectangle fixe, et les branches latérales du rectangle mobile, traversées par des courans parallèles et ascendans, exercent l'une sur l'autre une attraction plus ou moins forte; quelle que soit la position que l'on donne d'abord au rectangle mobile, on le voit tourner sur lui-même pour amener l'une ou l'autre de ses branches aussi près qu'il est possible de la branche a . Ainsi deux courans parallèles qui sont dans le même sens s'attirent; on peut même, pour mieux encore s'assurer de cette vérité, rendre les courans descendans dans les branches qui agissent l'une sur l'autre, au lieu de les rendre ascendans comme nous venons de le dire. Pour cela il suffit de retourner la bascule s' en laissant la bascule s dans sa position. Alors le courant entre par m , et la bascule a étant en avant, comme tout à l'heure, il arrive par la bande b' dans la cavité e' , entre par le côté horizontal a'' , fait le tour du rectangle, revient en e , et passe dans la bande b'' ; de là il continue son chemin par m , monte par la colonne v' , arrive en l , puis dans la coupe m , pour passer en g , et par conséquent pour faire le tour du rectangle mobile en descendant par les branches latérales et revenir ensuite en g' , on f' m' , en l , en v et à la bascule s' . Ces deux courans parallèles descendans exercent l'un sur l'autre la même attraction que les deux courans parallèles ascendans.

Maintenant, pour faire passer les courans en sens

contraire, c'est-à-dire pour rendre l'un d'eux ascendant et l'autre descendant, il suffit encore de tourner convenablement les bascules sans rien déranger à l'appareil. Veut-on, par exemple, que le courant soit descendant dans le rectangle mobile? et ascendant suivant la branche a du rectangle fixe, on laissera la bascule s' pour que le courant entre par m , et l'on tournera seulement la bascule a pour la faire cette fois plonger en arrière. Alors, de a le courant passe à la branche b , en e , et monte suivant la branche a pour traverser, redescendre et revenir en n' , en b' , passer en m' et continuer sa route comme tout à l'heure. Veut-on, au contraire, que le courant soit descendant suivant la branche a et ascendant suivant les côtés latéraux du rectangle mobile? il suffira de ébanger la bascule s' , puisque le courant devra, de cette manière, monter par la colonne v , arriver dans la coupe g' , revenir en g , et de là en m , en l , en v' , en m' , et par conséquent entrer par la bande b' dans le rectangle fixe pour traverser le côté horizontal et venir descendre par la branche a . On démontre de cette manière que deux courans parallèles et marchant en sens contraire se repoussent.

420. De la force qui s'exerce entre les courans rectilignes non parallèles. — Puisque les courans parallèles s'attirent ou se repoussent, il est présumable que les courans inclinés l'un et l'autre, soit dans le même plan, soit dans des plans différens, ne doivent pas être sans action mutuelle. En effet, M. Ampère a démontré qu'ils tendent sans cesse à prendre la position de parallélisme, et que, dans cette position, leur équilibre est stable s'ils vont dans le même sens, et instable s'ils vont en sens contraire. Pour en faire l'expérience on ajuste dans l'appareil de la figure 420 les deux rectangles qui sont représentés dans la figure 414; celui d'en haut, destiné à être mobile sur ses deux pointes, se place dans les coupes d , d' , et celui d'en bas se pose sur la table t et t' , ses deux appendices a , a' plongeant dans les deux cavités a , a' ; pour celui-ci, au lieu d'un seul contour rectangulaire, on peut en employer plusieurs isolés l'un de l'autre et faisant l'office de multiplicateur. On voit, par cette disposition, que le simple mouvement des bascules a et a' suffira pour établir les communications et pour faire passer le courant dans telle direction que l'on voudra, soit dans le côté inférieur du rectangle mobile, soit dans le côté supérieur du rectangle fixe; car ce sont les deux côtés qui doivent agir l'un sur l'autre. Or, après avoir donné primitivement au rectangle mobile une direction quelconque, on le voit, dès que le circuit est établi, tourner autour de son axe de suspension, venir se placer dans la position que représente la figure 414, et se diriger toujours de manière que dans ce parallélisme les courans marchent dans le même sens. Cette position seule donne de la stabilité à son équilibre, car il y revient par une série d'oscillations quand on l'en écarte; et lorsqu'on l'a placé d'abord dans une position dia-

métralement opposée, il y reste en équilibre instable, pour en sortir au moindre choc, et regagner enfin la direction de stabilité. Cette loi remarquable de l'action des courants non parallèles peut être encore exprimée d'une autre manière; bien qu'ils ne soient pas dans le même plan, on peut les regarder comme faisant entre eux un certain angle, et, considérant alors les diverses portions des courants à partir du sommet de cet angle, on peut dire : *Que deux portions de courants s'attirent quand elles vont l'une et l'autre en s'approchant ou en s'éloignant du sommet de l'angle, et qu'elles se repoussent quand elles vont l'une en s'éloignant et l'autre en s'approchant de ce même sommet.* Ainsi s' et s (Fig. 414 bis) étant deux courants inclinés situés dans des plans différents et faisant entre eux un angle dont le sommet est en s , les portions s' et s se repoussent, puisque la première s'éloigne et la seconde s'approche du sommet; il en est de même des portions sc et s' , tandis qu'au contraire les portions sc et s' s'attirent comme s'éloignant l'une et l'autre du sommet, et les portions ss et s' s'attirent comme s'en approchant l'une et l'autre. Par conséquent, si sc est mobile, on le verra tourner pour prendre la position dans laquelle c sera correspondant à c' et s à s' . Cet énoncé nous offrira de grands avantages pour expliquer les phénomènes de rotation que nous allons observer.

421. *De la rotation des courants par l'action des courants.* — Ces phénomènes sont produits au moyen des appareils qui sont représentés dans les figures 404, 406. Dans le vase v du second l'on met un rectangle mobile semblable à celui de la figure 386, et dans le vase v du premier l'on met successivement les pièces mobiles représentées dans les figures 400, 401, 402 et 403. Mais avant de décrire les effets nous allons en indiquer la cause.

Conservons un courant rectiligne indéfini sc (Fig. 414 ter) allant de s en c , et un autre courant, on seulement une portion de courant s' allant de s' en c' et pouvant se mouvoir parallèlement à elle-même; s' et c' n'ont aucun point de contact avec sc ; mais ces deux lignes, sans se couper directement, font entre elles un angle dont nous pouvons supposer la sommet en s . Les portions sc et s' s'attirent comme s'éloignant toutes deux du sommet de l'angle; les portions s' et sc se repoussent, puisque la première s'éloigne du sommet, tandis que la seconde en approche; donc le courant s' et, attiré dans l'angle csc , et repoussé dans l'angle $c's$, devra se mouvoir de s vers c et prendre un mouvement progressif continu. Cette expérience serait assez difficile à tenter à cause de l'embarras que l'on éprouverait à suspendre s' et c' pour lui permettre cette espèce de translation parallèle. Mais, au moyen d'une légère modification qui ne change rien au raisonnement, il devient facile de réaliser ce phénomène curieux. Au lieu du courant rectiligne sc prenons un courant circulaire, et même,

pour lui donner plus d'énergie, prenons un courant circulaire plusieurs fois replié sur lui-même, formant un véritable multiplicateur. Un ruban de cuivre, couvert de soie, et tourné en hélice, remplit très bien cet objet. Dans le cercle intérieur d'une telle hélice, concevons que l'on suspende l'appareil de la figure 386 et que l'on fasse passer le courant dans les contours de l'hélice et dans les branches de l'appareil suspendu; il est évident que nous aurons ainsi une rotation continue dont la vitesse sera proportionnée à la force de la pile et dont la direction sera dépendante de la direction du courant dans les branches verticales sc et dans les replis de l'hélice. Dans la disposition que représenterait alors la figure, le mouvement devrait se faire en sens inverse de la direction du courant dans l'hélice; il continuerait de se faire ainsi sans remonter chemin si l'on changeait à la fois les directions du courant fixe et celle du courant mobile; et, au contraire, il s'arrêterait bientôt pour recommencer en sens inverse si l'on changeait les directions du courant fixe sans changer celle du courant mobile, ou vice versa.

Le ruban de cuivre ou le simple fil roulé en hélice et faisant l'office de multiplicateur est ajusté autour du vase v , figure 405; x est l'une de ses extrémités et z l'autre, le bord du vase est replié sur l'hélice et l'enveloppe extérieurement pour la mettre à l'abri des gouttes de liquide qui pourraient tomber et qui établiraient alors une communication entre les divers plis de l'hélice.

Les pièces de l'appareil sont disposées pour que l'on puisse, à volonté, changer la direction du courant dans l'hélice seulement, ou dans le courant.

Il est vrai que dans cette expérience l'action de la terre s'exerce sur le courant mobile pour lui imprimer un mouvement de rotation continu, analogue à celui que l'on observe; mais si l'hélice a un assez grand nombre de tours, sa force l'emporte sur celle de la terre, comme il est facile de le voir par le sens du mouvement; car, en changeant la direction du courant dans l'hélice seule, le courant mobile se met alors successivement dans un sens et dans l'autre, et ses vitesses sont inégales, puisque l'une d'elles est combattue et l'autre favorisée par l'action de la terre.

M. Savary a observé un autre phénomène de rotation très remarquable dont toutes les circonstances ne sont peut-être pas expliquées par le principe précédent. Considérons un ruban de cuivre mince plié en cercle (Fig. 400), de manière que ses deux extrémités a et a' ne se joignent pas tout-à-fait, l'espace qui reste entre elles étant rempli par une petite bande d'ivoire ou de quelque autre substance non conductrice; près de l'extrémité a est soudé un petit fil de cuivre x qui se replie horizontalement, pour aller rejoindre un autre fil non conducteur attaché au cercle en un point diamétralement opposé. Cet appareil peut être mis en équilibre par

la pointe p du fil horizontal dans la coupe e du vase v de la figure 404, le cercle a a' plongeant dans l'eau acidulée de ce vase. Alors, si l'on fait passer le courant, le cercle se met à tourner comme celui de la figure 389; la rotation n'est pas due à un courant extérieur puisqu'il n'y a pas d'hélice autour du vase v ; elle n'est pas due non plus au magnétisme terrestre, car elle se fait toujours dans le même sens, soit que le courant monte, soit qu'il descende suivant a a' , avec cette seule différence que la vitesse est un peu moindre quand elle est opposée à celle que produirait la terre. Il y a donc une autre cause différente de celles que nous avons observées jusqu'à présent; M. Savary la trouve dans les courants qui sortent du cercle mobile et qui traversent l'eau acidulée pour se rendre aux parois du vase. Par exemple, quand le courant descend par la branche a a' , il doit parcourir le cercle a a' depuis a jusqu'en a' , et sortir par chacun de ses points; g s étant l'un de ses courants sortants, il y aura dans l'angle s g t une répulsion plus grande que dans l'angle s g r' , et par conséquent un mouvement de rotation dans le sens rs , comme on l'observe en effet. De même, quand le courant viendra de l'eau acidulée pour entrer dans le cercle mobile et monter suivant a a' , il y aura encore dans l'angle s g t une répulsion un peu plus grande que dans l'angle s g r' , puisque le courant de g en a est un peu plus fort que de a en g , et par conséquent mouvement de rotation dans le même sens, c'est-à-dire suivant a g s .

La rotation se fait en sens inverse avec l'appareil de la figure 401, parce que la branche verticale s y trouve soudeée à l'extrémité a' .

On observe les mêmes phénomènes avec les hélices planes *sinistrorsum* et *dextrorsum* représentées dans les figures 402 et 403.

Dans tous les cas, il y a des conditions à remplir relativement à la force de la pile et à la conductibilité du liquide qui environne le cercle mobile, afin que l'action répulsive des courants soit plus forte que l'action de la terre; car, dans certaines circonstances, c'est celle-ci qui l'emporte, et le mouvement change de sens quand on change la direction du courant.

422. *De l'équilibre des courants.* — Après avoir fait connaître, dans ce qui précède, les principaux phénomènes qui résultent de l'action mutuelle des courants sur les courants, nous devons essayer à présent de donner une idée des principes simples et peu nombreux sur lesquels M. Ampère a fondé une théorie mathématique de ces phénomènes qu'il appelle, en général, *phénomènes électro-dynamiques*, parce qu'ils résultent de l'électricité en mouvement. Cette théorie est développée d'une manière complète dans le grand et beau travail qu'il a publié en 1826 (*Théorie des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience*), et nous ne pouvons mieux faire que d'en rapporter textuellement les passages suivants :

« Les divers cas d'équilibre que j'ai constatés, dit M. Ampère, par des expériences précises, donnent immédiatement autant de lois qui conduisent directement à l'expression mathématique de la force, que deux éléments de conducteurs voltaïques exercent l'un sur l'autre, d'abord en faisant connaître la forme de cette expression, ensuite en déterminant les nombres constants, mais d'abord inconnus, qu'elle renferme, précisément comme les lois de Képler démontrent d'abord que la force qui retient les planètes dans leurs orbites tend constamment au centre du soleil, puisqu'elle change pour une même planète en raison inverse du carré de sa distance à ce centre, enfin que le coefficient constant qui en représente l'intensité a la même valeur pour toutes les planètes. Ces cas d'équilibre sont au nombre de quatre :

« Le premier démontre l'égalité des valeurs absolues de l'attraction et de la répulsion qu'on produit en faisant passer alternativement en deux sens opposés le même courant dans un conducteur fixe dont on ne change ni la situation, ni la distance au corps sur lequel il agit.

« Le second consiste dans l'égalité des actions exercées sur un conducteur rectiligne mobile, par deux conducteurs fixes situés à égale distance du premier, et dont l'un est rectiligne, l'autre plié et contourné d'une manière quelconque, quelles que soient d'ailleurs les sinuosités que forme ce dernier.

« Le troisième consiste en ce qu'un circuit fermé de forme quelconque ne saurait mettre en mouvement une portion quelconque d'un fil conducteur formant un arc de cercle dont le centre est dans un axe fixe, autour duquel il peut tourner librement et qui est perpendiculaire au plan du cercle dont cet arc fait partie.

« Le quatrième a pour but de prouver que trois courants circulaires étant dans le même plan, leurs centres o , o' , o'' sur la même droite, leurs rayons formant une progression géométrique continue, le courant du milieu restera immobile quand les distances o o' et o' o'' seront entre elles dans le même rapport que les termes consécutifs de cette proportion. »

Le premier cas peut se démontrer au moyen du fil de la figure 411, dont on pose les deux extrémités a a' dans les cavités a , a' de l'appareil général de la figure 420. Ce fil, revêtu de soie et replié sur lui-même, est tel que le courant qui monte par une des branches descend par l'autre, les actions de ces courants opposés s'exerçant sensiblement à la même distance sur les courants ou sur les aimans qu'on en approche, ne produisent plus aucun phénomène, ni de direction, ni d'attraction.

Le deuxième cas peut se démontrer au moyen du fil de la figure 412, dont on pose pareillement les deux extrémités a , a' dans les deux cavités a , a' du grand appareil de la figure 420. Ce fil, revêtu de soie, est encore replié sur lui-même; mais l'une

des branches est rectiligne, tandis que l'autre est sinuée, et la compensation se fait encore très exactement entre les actions contraires des courants opposés qui parcourent ces branches.

Le troisième cas se démontre au moyen de l'appareil représenté dans la figure 418. Voici l'expérience telle que la décrit M. Ampère dans l'ouvrage cité plus haut.

« Sur un pied en bois s'élèvent deux colonnes, $z z'$, $x' x'$, liées entre elles par deux traverses $l' l'$, $r r'$; un axe $g n$ est maintenu entre ces deux traverses dans une position verticale. Ses deux extrémités o , n , terminées en pointes aiguës, entrent dans deux trous couliques pratiqués, l'un dans la traverse inférieure $l' l'$, l'autre à l'extrémité d'une vis k portée par la traverse supérieure $r r'$, et destinée à presser l'axe $g n$ sans le forcer. En g est fixé invariablement à cet axe un support $q o$ dont l'extrémité o présente une charnière dans laquelle est engagé par son milieu un arc de cercle aa' formé d'un fil métallique qui reste constamment dans une position horizontale, et qui a pour rayon la distance du point o à l'axe $o n$. Cet arc est équilibré par un contre-poids q , afin de diminuer le frottement de l'axe $g n$ dans les trous couliques où ses extrémités sont reçues.

« Au-dessous de l'arc aa' sont disposés deux augets m , m' pleins de mercure, de telle sorte que la surface du mercure, s'élevant au-dessus des bords, vienne toucher l'arc aa' en a et a' . Ces deux augets communiquent par des conducteurs métalliques, $m m$, $m' m'$, avec des coupes r , r' pleines de mercure. La coupe r et le conducteur $m m$ qui la réunit à l'auget m sont fixés à un axe vertical qui s'enfonce dans la table de manière à pouvoir tourner librement. La coupe r' , à laquelle est attaché le conducteur $m' m'$, est traversée par le même axe, autour duquel elle peut tourner aussi indépendamment de l'autre. Elle en est isolée par un tube de verre v qui enveloppe cet axe, et par une rondelle de verre w qui le sépare du conducteur de l'auget m , de manière qu'on peut disposer les conducteurs $m m$, $m' m'$ sous l'angle qu'on veut.

« Deux autres conducteurs $l n$, $l' n'$ attachés à la table plongent respectivement dans les coupes r , r' , et les font communiquer avec des cavités a , a' creusées dans la table et remplies de mercure. Enfin, une troisième cavité s pleine également de mercure se trouve entre les deux autres.

« Voici la manière de faire usage de cet appareil : on fait plonger l'un des réophores, par exemple, le réophore positif dans la cavité a , et le réophore négatif dans la cavité s , qu'on met en communication avec la cavité a' par un conducteur curviligne d'une forme quelconque. Le courant suit le conducteur $l n$, passe dans la coupe r , de là dans le conducteur $m m$, dans l'auget m , le conducteur $m' m'$, la coupe r' , le conducteur $l' n'$, et enfin de la cavité s , dans le conducteur curviligne qui commu-

nique avec le mercure de la cavité s où plonge le réophore négatif.

« D'après cette disposition le circuit voltaïque total est formé :

« 1°. De l'arc aa' et des conducteurs $m m$, $m' m'$;
« 2°. D'un circuit qui se compose des parties $l n$, r , $m m$, $m' m'$ de l'appareil du conducteur curviligne allant de n' en s et de la pile elle-même.

« Ce dernier circuit doit agir comme un circuit fermé, puisqu'il n'est interrompu que par l'épaisseur du verre qui isole les deux coupes r , r' : il suffira donc d'observer son action sur l'arc aa' pour constater par l'expérience l'action d'un circuit fermé sur un arc dans les différentes positions qu'on peut donner à l'un et à l'autre.

« Lorsqu'un moyen de la charnière $o n$ met l'arc aa' dans une position telle que son centre soit hors de l'axe $g n$, cet arc prend un mouvement et glisse sur le mercure des augets m , m' en vertu de l'action du courant curviligne fermé qui va de n' en s . Si au contraire son centre est dans l'axe, il reste immobile ; d'où il suit que les deux portions du circuit fermé qui tendent à le faire tourner en sens contraire autour de l'axe exercent sur cet arc des moments de rotation dont la valeur absolue est la même, et cela, quelle que soit la grandeur de la partie ns déterminée par l'ouverture de l'angle des conducteurs $m m$, $m' m'$. Si donc on prend successivement deux arcs aa' qui diffèrent peu l'un de l'autre ; comme le moment de rotation est nul pour chacun d'eux, il sera nul pour leur petite différence, et par conséquent pour tout élément de circonférence dont le centre est dans l'axe ; d'où il suit que la direction de l'action exercée par le circuit fermé sur l'élément passe par l'axe, et qu'elle est nécessairement perpendiculaire à l'élément.

« Lorsque l'arc aa' est situé de manière que son centre soit dans l'axe, les portions de conducteur $m m$, $m' m'$ exercent sur l'arc aa' des actions répulsives égales et opposées, en sorte qu'il ne peut en résulter aucun effet ; et puisqu'il n'y a pas de mouvement, on est sûr qu'il n'y a pas de moment de rotation produit par le circuit fermé.

« Lorsque l'arc aa' se meut dans l'autre situation où nous l'avions d'abord supposé, les actions des conducteurs $m m$ et $m' m'$ ne sont plus égales : on pourrait croire que le mouvement n'est dû qu'à cette différence ; mais suivait qu'on approche ou qu'on éloigne le circuit curviligne qui va de n' en s , le mouvement est augmenté ou diminué, ce qui ne permet pas de douter que le circuit fermé ne soit pour beaucoup dans l'effet observé.

« Ce résultat ayant lieu quelle que soit la longueur de l'arc aa' , aura nécessairement lieu pour chacun des éléments dont cet arc est composé. Nous tirerons de là cette conséquence générale, que l'action d'un circuit fermé, ou d'un ensemble de circuits fermés quelconques, sur un élément infiniment petit d'un courant électrique, est perpendiculaire à cet élément. »

Le quatrième cas se démontre au moyen de l'appareil représenté dans la figure 419-421. Voici encore la description de l'expérience telle que la donne M. Ampère.

« Sur une tablette en bois est creusée une cavité A , remplie de mercure, d'où part un conducteur fixe $ASCBSTU$ formé d'une lame de cuivre; la portion CBT est circulaire, et les parties CSA , XTU sont isolées l'une de l'autre par la soie qui les recouvre. En U ce conducteur est soudé à un tube de cuivre GH , surmonté d'une coupe I , qui communique avec la tube par le support NT du même métal. De la coupe I part un conducteur mobile $IKLMNQRS$, dont la portion MNR est circulaire; il est entouré de soie dans les parties MIK et RQA pour qu'elles soient isolées, et il est tenu horizontal au moyen d'un contre-poids a fixé sur une circonférence de cercle qu'un prolongement b de la lame dont est composé le conducteur mobile forme autour du tube GH . La coupe I est soutenue par une tige ST , ayant le même axe que GH , dont elle est isolée par une substance résineuse que l'on coule dans le tube. Le pied de la tige ST est soudé au conducteur fixe $TUVXYZA'$, qui sort du tube GH , par une ouverture assez grande pour que la résine l'en isole aussi complètement dans cet endroit qu'elle le fait dans le reste du tube GH , à l'égard de ST . Ce conducteur, à sa sortie du tube, est revêtu de soie pour empêcher la portion TUV de communiquer avec $XYZA'$. Quant à la portion XYZ , elle est circulaire; et l'extrémité A' plonge dans une seconde cavité A' creusée dans la table et pleine de mercure.

« Les centres o , o' , o'' des trois portions circulaires sont en ligne droite; les rayons des cercles qu'elles forment sont en proportion géométrique continue, et l'on place d'abord le conducteur mobile de manière que les distances oo' , $o'o''$ soient dans le même rapport que les termes consécutifs de cette proportion; de sorte que les cercles o et o' forment un système semblable à celui des cercles o' et o'' . On plonge alors le réophore positif en A et le réophore négatif en A' , le courant parcourt successivement les trois cercles dont les centres sont en o , o' , o'' , qui se repoussent deux à deux, parce que le courant va en sens opposé dans les parties voisines. »

En s'appuyant sur ces données, M. Ampère est parvenu à une équation générale qui embrasse la théorie complète de l'action des courants sur les courants; seulement, pour déterminer le signe de l'une des constantes qui entrent dans cette équation, il a recours encore à un fait bien facile à constater par l'expérience directe; savoir, qu'un conducteur rectiligne indéfini attire un circuit fermé, quand le courant électrique de ce circuit va dans le même sens que celui du conducteur dans la partie qui en est la plus voisine, et qu'il le repousse dans le cas contraire; fait très simple qui se trouve encore confirmé par une conséquence immédiate à laquelle il

conduit; savoir, que les parties rectilignes d'un même courant se repoussent. En effet, vv' (Fig. 413) étant un vase en terre rempli de mercure, mais séparé en deux compartiments par la cloison ce' ; et $abab'$ étant un fil revêtu de soie, flottant sur le mercure et le touchant seulement par ses deux extrémités a et a' ; si dans chaque compartiment on plonge l'un des pôles de la pile, le courant passe du mercure au fil, et celui-ci se trouve repoussé, ce qui est une preuve qu'il y a véritablement répulsion entre les parties du courant qui suivent les branches horizontales ab et $a'b'$, et les parties du courant qui sillonnent le mercure, soit pour affluer à l'une des extrémités, soit pour sortir par l'autre et regagner le pôle négatif de la pile.

Ainsi, M. Ampère a le double mérite d'avoir découvert tous les phénomènes essentiels qui résultent de l'action des courants sur les courants et d'avoir fondé une théorie mathématique au moyen de laquelle il résout habituellement toutes les difficultés qui se présentent, et tous les faits qui ont été observés jusqu'à présent sur les attractions et les répulsions des courants, sur leurs positions d'équilibre et sur les mouvements de rotation qu'ils peuvent prendre sous des conditions données.

423. Des solénoïdes et de leurs rapports avec les aimans. — M. Ampère a essayé d'expliquer aussi, par les mêmes principes, tous les phénomènes qui résultent de l'action des aimans sur les courants et même ceux qui résultent de l'action des aimans sur les aimans et sur les substances magnétiques. Dans les applications de cette nature, il se présente toujours deux espèces de difficultés : celles qui tiennent aux calculs et celles qui tiennent aux hypothèses physiques que l'on est obligé de faire. Pour le cas qui nous occupe, les calculs ont l'avantage d'être très faciles : M. Ampère a donné à toutes ses formules beaucoup d'élégance et de simplicité; mais les diverses hypothèses sur lesquelles il faut s'appuyer pour construire les aimans avec des courants, sans être en contradiction manifeste avec les phénomènes connus, ne sont pas peut-être aussi conformes à la vérité qu'elles sont ingénieuses en apparence. Il faut supposer que chaque particule des corps magnétiques est animée d'un courant électrique qui se meut sans cesse autour d'elle, dans un plan déterminé, mais variable; que dans les corps non aimantés, ces courants élémentaires ont toutes les directions possibles et ne peuvent par conséquent produire aucun phénomène extérieur, puisque les actions de ceux qui tournent dans un sens sont à chaque instant détruites par les actions contraires de ceux qui tournent en sens opposé; que l'aimantation fixe des barreaux trempés résulte d'une cause extérieure qui dirige dans un sens déterminé, et d'une manière permanente, les courants de toutes les molécules; que l'aimantation passagère pro-

duit le même effet, tant que la cause extérieure est agissante, et qu'aussitôt qu'elle cesse les courants moléculaires reprennent leurs directions diverses dont les effets se neutralisent au dehors; que ces courants, quoique infiniment nombreux et très énergiques, ne produisent pas de chaleur sensible, puisqu'on n'observe pas une différence de température entre les corps magnétiques et les milieux qui les environnent, etc., etc.

Ces hypothèses, cependant, ne sont pas purement gratuites; car elles peuvent servir à déterminer et même à calculer les phénomènes dont nous avons parlé dans les deux chapitres précédents. De plus, si l'on essaie d'arranger directement des courants à peu près comme on conçoit qu'ils existent dans les aimans, on parvient à reproduire des phénomènes d'attraction et de répulsion qui paraissent très analogues aux phéno-

mènes magnétiques. Un fil de métal revêtu de soie et roulé sur un cylindre en apires très serrées forme ce que M. Ampère appelle un *solénoïde*; et, bien que cet appareil ne soit qu'une imparfaite imitation des aimans, on observe que, quand il est traversé par un courant, il se dirige sous l'influence du magnétisme de la terre, il attire ou repousse un autre solénoïde pareil selon le pôle qu'on lui présente; enfin il est dirigé par les courants et sollicité par eux à peu près comme les aimans.

Ces expériences, et même ces analogies, sont certainement très curieuses, et l'on peut espérer qu'elles conduiront à des phénomènes nouveaux qui serviront à établir d'une manière sûre et directe l'identité du magnétisme et de l'électricité, ou à découvrir quelque différence caractéristique entre ces deux grands agens de la nature.

CHAPITRE IV.

DES PHÉNOMÈNES THERMO-ÉLECTRIQUES.

424. On appelle *phénomènes thermo-électriques* ceux qui résultent des courants électriques que l'on peut exciter dans les métaux par les seules variations de température. Le Dr Seebeck démontra l'existence de ces courants en l'année 1821, et cette observation fut une des premières et des plus ingénieuses applications de la découverte de M. Ohm. L'appareil de M. Seebeck est représenté dans la *figure 406*; il se compose d'un cylindre *a* de bismuth ou d'antimoine, aux deux extrémités duquel on a soudé une lame de cuivre *lmf* avec de la soudure ordinaire; on peut le tenir à la main par la partie *m*, qui est pour cette raison enveloppée de soie ou d'étoffe. Ce circuit métallique, dans son état naturel, n'exerce aucune action sur une aiguille aimantée qu'on lui présente d'une manière quelconque; mais si l'on chauffe une des soudures *s* ou *s'*, il devient à l'instant, dans tous ses points, capable d'imprimer divers mouvemens aux aiguilles et même aux substances magnétiques. Ces mouvemens indiquent d'une manière certaine la présence d'un courant électrique qui traverse tout le circuit métallique, et toujours dans le même sens, aussi long-temps que la soudure échauffée conserve son élévation de température au-dessus de la soudure qui ne l'est pas. Par exemple, si c'est la soudure *a* qui s'est été présentée quelques instans sur la flamme d'une bougie ou près d'un corps chaud, ou seulement touchée avec la main, l'appareil exerce alors sur l'aiguille aimantée mêmes actions que pourrait exercer un

courant traversant le circuit dans le sens *s s' l m l*. De l'identité des effets il faut bien déduire l'identité des causes, et conclure que dans ces circonstances la chaleur excite dans les métaux des courants électriques.

En laissant la soudure *s* revenir à son état naturel, et en chauffant la soudure *s'*, on obtient le même effet on *sens inversé*, le courant se dirige alors suivant *s' s l m l*.

En portant les deux sondures à la même température, ces effets opposés doivent se détruire, et c'est aussi ce que l'expérience confirme.

On démontre pareillement que refroidir l'une des soudures en laissant l'autre à son état naturel, est la même chose que chauffer celle-ci.

C'est donc la différence seule de température aux deux points de jonction, qui détermine ce singulier phénomène de circulation électrique.

La chaleur paraît n'être ici qu'une cause accidentelle et non pas une force qui donne l'impulsion à l'électricité. Nous savons que la force électro-motrice existe au contact de tous les corps, qu'elle existe par conséquent au contact de l'antimoine et du cuivre, et que, certainement, dans l'appareil de la *Fig. 406*, le cylindre d'antimoine possède l'un des fluides, tandis que le cuivre possède l'autre; la circulation ne peut pas s'établir, parce que, à température égale, les forces électro-motrices sont égales entre elles aux deux soudures ou aux deux contacts *s* et *s'*; mais si une cause quelconque donne à l'une de ces forces électro-

motrices l'avantage sur l'autre, à l'instant la circulation s'établira comme si l'on avait remplacé, par une simple rondelle humide, le contact où se trouve la force la plus faible.

Ce changement de la force électro-motrice peut se faire de deux manières : on peut concevoir que les tensions électriques des deux métaux qui se touchent augmentent ou diminuent proportionnellement, ou bien que les tendances électriques de ces métaux éprouvent elles-mêmes quelques modifications; or, la chaleur produit ce double phénomène, car, de deux métaux qui se touchent, celui qui était positif à une certaine température peut quelquefois devenir négatif à une autre température; ainsi les courans thermo-électriques paraissent n'être qu'une conséquence de ces modifications diverses, que la chaleur imprime aux tendances électriques.

Pour étudier les corps, sous ce rapport, on peut employer, avec avantage, le multiplicateur représenté dans la Fig. 377, en disposant l'expérience de la manière suivante : 1° On fera plonger chacune des extrémités du fil du multiplicateur dans un godet de mercure, maintenu soigneusement à la température zéro; 2° On prendra un fil double, c'est-à-dire, composé des deux métaux que l'on veut soumettre à l'expérience; ils seront soudés bout à bout, comme on le voit dans la Fig. 407, pour l'or et le palladium; ce fil double plongera par chacune de ses extrémités *a* et *p* dans l'un des godets de mercure, où viendront déjà les extrémités du multiplicateur; 3° Enfin, l'on portera la soudure *s* à une température constante, et l'on observera la déviation correspondante de l'aiguille. Il suffira de savoir ensuite quelle est la force correspondante à chaque déviation.

Plusieurs physiciens ont essayé d'établir entre les métaux l'ordre suivant lequel ils paraissent positifs ou négatifs dans le circuit thermo-électrique : nous nous bornerons à indiquer le tableau suivant, que l'un doit aux intéressantes recherches de M. Cumming; il suffit de le comparer à celui que nous avons rapporté (412), pour voir à quel point la chaleur change les dispositions électriques des différens corps. Dans ce tableau, chaque métal est positif avec tous ceux qui le suivent, et négatif avec ceux qui le précèdent.

1 Bismuth.	11 Rhodium.
2 Mercure.	12 Laiton.
3 Nickel.	13 Cuivre.
4 Platine.	14 Or.
5 Palladium.	15 Zinc.
6 Cobalt.	16 Charbon.
7 Manganèse.	17 Plombagine.
8 Argent.	18 Fer.
9 Étain.	19 Arsenic.
10 Plomb.	20 Antimoine.

424 bis. *Thermomètre thermo-électrique.* — Je décrirai ici sous cette dénomination un petit appareil qui montre d'une manière frappante combien les moindres changemens de température sont efficaces pour exciter des courans électriques. Les lois de la conductibilité thermo-électrique, qui m'ont conduit à la construction de cet instrument, sont développées dans le chapitre suivant.

Le thermomètre thermo-électrique est représenté dans la figure 408.

La figure 409 en représente une coupe verticale, et la figure 410 une vue horizontale.

BB, figure 410, est une lame de bismuth d'environ un centimètre d'épaisseur, de 7 ou 8 centimètres de largeur, et de 20 centimètres de longueur. A chacune de ses extrémités, *co* *b* et *b'*, elle porte un petit cylindre d'un ou deux centimètres de diamètre, et de deux ou trois centimètres de hauteur. Ces petits cylindres sont aussi en bismuth; ils sont corps avec la lame; ils ont été fondus avec elle.

c *d* *e'* est une lame de cuivre recourbée, comme on le voit sur la figure, et portant deux petits appendices *c* et *e'*, par lesquels elle est soudée au bismuth; elle ne doit le toucher en aucun autre point. Les appendices circulaires peuvent être dorés à leur surface supérieure.

Les deux lames de bismuth et de cuivre forment ainsi un circuit fermé, dont les deux soudures sont en *c* et *e'*; un changement de température dans l'un de ces points doit déterminer un courant; et voici comment le courant est rendu sensible. On suspend à un fil de soie un système compensé analogue à celui de la figure 284; il est composé de 3 aiguilles à coudre, placées perpendiculairement dans un brin de paille; l'aiguille inférieure *a* *b* est entre les deux lames de cuivre et de bismuth; c'est pour cela que l'on a ménagé une fente dans la lame de cuivre, figure 410; l'aiguille du milieu *n* *b'* est immédiatement au-dessus du cuivre; et l'aiguille supérieure *a''* *b''* est plus ou moins inclinée pour achever la compensation et la rendre plus ou moins complète.

Les aiguilles sont couvertes d'une cloche, et l'on peut aussi couvrir avec de petites cloches les soudures *c* et *e'*, figure 408.

Cet instrument est d'une telle sensibilité qu'il suffit de souffler sur l'une des soudures pour que l'aiguille marche de plusieurs degrés, et, pour lui faire faire une révolution entière, il suffit de toucher un seul instant avec le bout du doigt l'une des deux soudures.

On peut noircir l'une des deux soudures au noir de fumée, et se servir de cet instrument pour étudier les phénomènes de la chaleur rayonnante, ou pour observer les effets calorifiques de la lumière.

CHAPITRE V.

DE LA CONDUCTIBILITÉ.

425. *Conductibilité des métaux.* — On a depuis long-temps séparé les corps en trois grandes sections ou en trois ordres, par rapport à leur faculté conductrice; dans le premier ordre se rangent les métaux, sans exception, à l'état solide ou liquide; dans le deuxième ordre on trouve tous les liquides et les diverses dissolutions qu'ils peuvent donner, presque toutes les substances végétales et animales, et la plupart des substances minérales; enfin, dans le troisième ordre, on ne compte qu'un très petit nombre de substances, comme le soufre, le verre et quelques pierres précieuses, les résines, la soie, la laine et plusieurs fourrures. Mais, pour établir des rapports numériques entre les conductibilités des diverses substances d'un même ordre, on éprouve de grandes difficultés. Autrefois on ne pouvait, par exemple, comparer entre eux les différents métaux que par la facilité plus ou moins grande avec laquelle ils transmettent les décharges électriques, et par les effets de chaleur qu'ils en éprouvent; mais rien n'est véritablement comparable dans ces expériences; les décharges elles-mêmes ne peuvent être graduées avec exactitude, et l'élévation de température que prennent les corps par la transmission de l'électricité, est un phénomène complexe qui dépend de leur capacité pour la chaleur, aussi bien que de leur conductibilité électrique.

La pile de Volta donne des moyens de comparaison beaucoup plus précis; plusieurs physiciens l'ont employée à résoudre la question importante de la conductibilité des métaux; mais nous nous bornerons à rapporter ici les résultats qui ont été obtenus par sir H. Davy.

Concevons une pile de Wollaston, composée d'un grand nombre de paires, et chargée d'une eau acidulée assez faible pour qu'elle puisse conserver pendant long-temps une force sensiblement constante; supposons en outre que l'on puisse employer à volonté tel nombre de paires que l'on juge convenable, soit pour décomposer de l'eau acidulée, soit pour produire d'autres phénomènes chimiques. Lorsque la pile est en activité pour produire ces phénomènes, on peut joindre ses deux pôles par un fil de métal, et il est évident qu'une partie du courant passe alors par ce fil, tandis que l'autre partie continue d'agir chimiquement, mais avec une moindre intensité. On peut donc prendre un tel nombre de paires et un fil de telles dimensions, que le phénomène chimique cesse complé-

tement; alors on dit que le fil *décharge* la pile, et cela ne signifie pas qu'il lui enlève toute son électricité, mais seulement que, s'il lui en enlevait un peu moins, le phénomène chimique commencerait à se reproduire: c'est par ce moyen très ingénieux que sir H. Davy est parvenu à établir deux lois fondamentales de la conductibilité des métaux, savoir :

Premièrement, que la conductibilité est proportionnelle au carré du diamètre des fils, ou en général à la surface de la section des fils ou des lames; secondement, qu'elle est en raison inverse de leur longueur.

Quant au rapport numérique de la conductibilité des divers métaux, sir H. Davy a trouvé les résultats suivants, qui sont exprimés, en supposant que la faculté conductrice du platine soit représentée par 100.

Argent. . . .	600	Or. . . .	400
Cuivre. . . .	550	Plomb. . .	380
Étain. . . .	109	Fer. . . .	82
Platine. . . .	100		

La découverte de l'électro-magnétisme a fourni des moyens de comparaison plus simples et peut-être encore plus précis; M. Becquerel en a profité pour confirmer les deux lois générales que nous venons de rapporter, et pour comparer entre eux divers métaux. Le procédé dont il a fait usage semble soumis à plusieurs causes d'erreurs; mais son habileté à expérimenter a dû sans doute l'en garantir, et nous donnons avec confiance les nombres auxquels il est parvenu. La conductibilité du platine est encore représentée par 100 (*Ann. de Phys. et de Chimie*, t. XXXII, p. 420).

Cuivre. . . .	609	Platine. . .	100
Or. . . .	571	Fer. . . .	95
Argent. . . .	447	Plomb. . . .	50
Zinc. . . .	174	Mercure . .	21
Étain. . . .	94	Pétassium. .	8

Dans une série d'expériences que j'ai faites avec une grande pile d'un seul élément, je suis arrivé aux résultats suivants :

Argent à 2,986. .	860	Rosette. . .	224
Cuivre rouge. .	738	Laiton. . .	194
Argent 1 ^{re} tit. 0,948.	650	Fer. . . .	121
Or fin. . . .	623	Or à 19 karats.	109
Argent 2 ^e , tit. 0,800.	590	Platine. . .	100

Le courant de la pile n'avait à traverser que deux gros fils en enivre, puis le fil dont on voulait déterminer la facilité conductrice, et un grand cercle en cuivre au centre duquel était suspendue une aiguille aimantée dont on observait les déviations.

La conductibilité m'a paru très exactement proportionnelle à la section des fils, depuis les diamètres les plus fins que j'aie pu obtenir jusqu'aux diamètres de trois lignes environ, au-delà desquels je n'ai pas poussé mes expériences.

Pour la loi de la raison inverse de la longueur, elle ne m'a paru exacte que sous une condition : dans mon appareil, les forces électro-magnétiques qui servaient de mesure à la conductibilité se trouvaient proportionnelles aux tangentes des déviations de l'aiguille; et en employant successivement des longueurs $l, l',$ etc., d'un même fil, les tangentes $t, t',$ etc., des déviations, n'étaient jamais en raison inverse de ces longueurs : mais elles étaient en raison inverse de ces longueurs augmentées chacune d'une même quantité λ ; ainsi on avait

$$\frac{\lambda + l}{\lambda + l} = \frac{t}{t}, \quad \frac{\lambda + l}{\lambda + l'} = \frac{t}{t'}, \quad \frac{\lambda + l}{\lambda + l''} = \frac{t}{t''}, \text{ etc.}$$

Cette quantité λ , qui restait constante pour les diverses longueurs d'un même fil, changeait avec la nature de la substance, et pour chaque substance elle était en raison inverse de la section du fil. Il me semble par conséquent que la conductibilité est rigoureusement en raison inverse de la longueur des fils, pourvu que l'on tienne compte de la résistance qu'éprouve l'électricité à traverser le liquide qui sépare les éléments de la pile, et à parcourir les divers conducteurs qui doivent l'amener aux fils qui sont directement soumis à l'observation. Ainsi, quand on opère, par exemple, sur un fil d'argent de 1 millimètre de diamètre, il faut concevoir que tous les conducteurs dont je viens de parler réduisent la force du courant autant que pourrait la réduire un fil d'argent de 1 millimètre de diamètre, et d'une certaine longueur, par exemple, de 1 mètre; alors si l'on force le courant à passer successivement par deux fils pareils, l'un de 1 mètre et l'autre de 3 mètres, les tangentes des deux actions seront entre elles comme 2 est à 3, et non pas comme 1 est à 2, qui sont les deux longueurs véritablement soumises à l'expérience.

Sir H. Davy a démontré que la conductibilité d'une même substance diminue à mesure que la température s'élève, et qu'elle augmente ou contraire à mesure que la température s'abaisse. On en peut faire l'expérience sur un fil exposé entre les deux pôles de la pile; lorsqu'il est porté au rouge par le courant, si on le chauffe artificiellement dans une partie de sa longueur, on le voit devenir moins rouge dans les points qui ne sont pas frappés par la flamme; et au contraire, si on le refroidit dans une certaine étendue, les parties voisines

prennent un plus vif éclat. D'après cela, il est très probable que le rapport de la conductibilité change aussi avec la température et que les tableaux précédents présenteraient un ordre tout différent pour des températures un peu élevées.

426. *Conductibilité des métaux pour les courants thermo-électriques.* — Pour connaître la loi suivant laquelle un courant thermo-électrique s'affaiblit lorsqu'on le fait passer par des longueurs successivement croissantes d'un même fil, j'ai pris des fils de cuivre revêtus de soie, ayant un demi-millimètre de diamètre et coupés bout-à-bout dans la même bobine, l'un de 10 mètres de longueur et l'autre de 1 mètre seulement. Le premier a été enroulé sur le cadre d'un multiplicateur de manière à faire dix tours; la longueur excédante a été enroulée à part pour qu'elle ne puisse exercer aucune action électro-dynamique; le second fil a été enroulé sur le même cadre de manière qu'il ne fasse qu'un seul tour. Cela posé, les extrémités du premier fil ont été sondées chacune à l'extrémité d'un cylindre de bismuth de deux pouces de longueur et d'un demi-pouce de diamètre, et les extrémités du second ont été parallèlement soudées aux extrémités d'un autre cylindre de bismuth, ayant une section quadruple de celle du premier et une longueur égale seulement à ses 4 dixièmes. Dans chaque circuit l'une des soudures a été mise à zéro et l'autre à 100°, mais avec cette attention, que les courants fussent dirigés en sens contraire dans les fils; alors l'aiguille très sensible du multiplicateur est restée immobile. Donc le courant était dix fois plus faible dans le long fil, car il agissait par dix tours dans le multiplicateur, tandis que le fil d'un mètre n'agissait que par un tour.

Donc l'intensité des courants thermo-électriques est en raison inverse de la longueur du circuit qu'ils parcourent.

Pour reconnaître si cette intensité est proportionnelle à la section du circuit métallique, j'ai pris le fil précédent de 1 mètre, et un autre fil pareil ayant une section dix fois plus grande et une longueur décuple. Ces fils ont été enroulés comme les précédents, mais en faisant chacun un seul tour sur le cadre du multiplicateur. Le courant a été dirigé en sens inverse dans les fils, et l'aiguille est restée encore parfaitement immobile. Donc l'intensité est bien en raison directe de la section du circuit, puisqu'un circuit dix fois plus long, mais ayant une section décuple, produit exactement le même effet.

La première conséquence qui se déduit de ces principes, c'est que pour les courants thermo-électriques le multiplicateur ne multiplie pas; car si l'on veut, par exemple, faire cent tours sur le cadre du multiplicateur, il faut prendre une longueur de fil cent fois plus grande que pour faire un tour; et le courant se trouve réduit par l'augmentation de longueur autant qu'il est augmenté par le doublement des tours.

Le thermomètre thermo-électrique qui a été décrit précédemment (424 bis) repose sur cette donnée fondamentale : c'est pour cela que la lame de bismuth doit être large et épaisse. Si la section de ce circuit était mille fois plus grande que la section d'un autre circuit semblable et de même longueur, son effet sur l'aiguille serait aussi mille fois plus grand, et il conserverait cet avantage lors même que le circuit le plus mince serait cent fois multiplié, pourvu qu'il prenne alors une longueur cent fois plus grande.

Ces résultats m'ont servi à comparer les conductibilités des différents métaux. Sans entrer ici dans la description détaillée des appareils, je dirai seulement que j'employais deux courants thermo-électriques égaux ; que le premier était affaibli en traversant le fil métallique soumis à l'expérience, et que le second était affaibli précisément de la même quantité en traversant des longueurs plus ou moins grandes d'un autre fil qui servait de terme de comparaison.

Voici maintenant les résultats des expériences. La conductibilité du mercure est représentée par 100, et toutes les autres sont rapportées à cette mesure, parce qu'il est très facile d'avoir du mercure parfaitement pur.

Tableau de la Conductibilité des métaux pour les courants thermo-électriques.

Noms des substances.	Diamètre du fil.		Longueurs sou- mises à l'ex- périence.		Conductibi- lité, celle du mercure étant 100.
	mm	mill.	mm	mill.	
Palladium	0,176	1900	1200	600	5791
Argent 963 de fin. . .	0,174	2000	1500	200	5152
Argent 900	0,194	id.	id.	id.	4753
Argent 857	0,178	1200	800	400	4221
Argent 747	0,179	1200	600	"	3882
Or pur.	0,178	1000	500	"	3975
Or 951.	0,176	600	300	"	1338
Or 781.	0,176	400	200	"	714
Cuivre pur.	0,182	2000	1000	600	3838
Id. recuit	id.	id.	id.	id.	3842
Platine	0,186	800	600	300	855
Laiton	0,182	"	"	"	1200
Acier fondu.	"	"	"	"	900
Id. recuit	"	"	"	"	800
Id. recuit	"	"	"	"	500
Id. recuit	"	"	"	"	700
Id. recuit	"	"	"	"	600

Le palladium, le platine, l'or, l'argent et le cuivre ont été purifiés à la monnaie : je les dois à la bienveillante amitié de M. d'Arcet et de M. Bréant ; les autres métaux ont été pris dans le commerce ou préparés directement et alliés en diverses proportions.

On voit que le palladium est le plus conducteur des métaux ; viennent ensuite l'argent, l'or et le

cuivre : le mercure est le plus mauvais conducteur des corps que j'ai soumis à l'expérience ; sa conductibilité est presque soixante fois moindre que celle du palladium.

La présence des substances étrangères altère singulièrement la conductibilité ; ce sera un excellent moyen de reconnaître la pureté des métaux.

Le laiton, l'acier et le fer ont été soumis à un grand nombre d'expériences ; j'ai rapporté seulement les limites entre lesquelles tous les résultats se trouvent compris.

La température n'a qu'une faible influence sur la conductibilité de certains corps : par exemple, de 0 à 100° le mercure ne varie que de quelques centièmes : mais entre les mêmes limites le fer et l'acier éprouvent une prodigieuse variation, leur conductibilité est souvent réduite au tiers ; la simple chaleur de la main produit des effets très sensibles ; et ce qui semble encore plus étonnant, c'est qu'il suffit de faire rougir une étendue de quelques millimètres sur la longueur d'un fil de fer ou d'acier pour que sa conductibilité devienne trois ou quatre fois moindre.

426 bis. De la mesure des courants thermo-électriques. — On peut déduire de ce qui précède un moyen de comparer, d'une manière absolue, les intensités des courants thermo-électriques. En effet ; concevons une source thermo-électrique constante, et supposons que le courant auquel elle peut donner naissance soit immédiatement reçu dans une colonne de mercure d'une longueur et d'une section données. Il est évident, par ce qui précède, que le courant deviendra deux fois, trois fois ou dix fois plus intense si l'on réduit la colonne de mercure à la moitié, au tiers en à la dixième partie de sa longueur, qu'il deviendra mille fois plus faible si l'on en augmente mille fois la longueur, et qu'il changera pareillement dans des proportions connues si l'on change la section de la colonne dans un rapport déterminé.

Ainsi dans cette hypothèse l'intensité d'un courant thermo-électrique serait définie d'une manière exacte et absolue pour tous les observateurs, dès qu'on aurait donné les dimensions de la colonne de mercure qu'il parcourt. La seule difficulté pour la mesure des courants est donc de trouver une source thermo-électrique constante, et de réduire les résultats à ce qu'ils seraient si l'électricité passait immédiatement de cette source dans la colonne de mercure. Or, il résulte de toutes les expériences que j'ai faites sur ce point que le contact du bismuth et du cuivre donne une source tout-à-fait constante entre les mêmes limites de température ; qu'on n'observe à cet égard qu'une différence insensible entre les différentes espèces de bismuth du commerce et des laboratoires, et entre les différentes espèces de cuivre des fabriques d'Imphy et de Romilly ; que le métal soudant et l'étendue de la sonde n'apportent aucune variation dans les résultats, pourvu toutefois (et ceci est une condition

essentielle), pourvu que la soudure soit bien exactement à la même température dans toutes ses parties. Au reste, il y a un moyen simple et sûr de vérifier ce fait : c'est d'observer la conductibilité du cuivre et du bismuth comparativement à celle du mercure ; et les conductibilités une fois connues, on peut substituer aux fils de cuivre et aux tiges de bismuth une longueur correspondante à la colonne de mercure, et obtenir ainsi le même résultat que si le courant passait directement de la source thermo-électrique dans la colonne de mercure, dont les dimensions caractérisent l'intensité. Au moyen de ces principes on peut facilement construire des galvanomètres comparables : en effet, prenons un fil dont la conductibilité soit connue, formons-en un galvanomètre, et observons la déviation qu'il éprouve par l'effet d'une source thermo-électrique connue, rompons le circuit pour forcer le courant à passer par des longueurs doubles, triples, et les forces deviendront deux fois, trois fois plus petites, etc.; et l'on formera une table des déviations correspondantes. Ainsi chaque instrument sera gradué, et pour comparer ensemble deux de ces instruments, il suffira de tenir note de l'intensité absolue de la source que l'on aura prise pour unité dans la construction de chacun d'eux.

427. *Conductibilité des liquides.* — Parmi les recherches qui ont été faites sur ce sujet, celles du professeur Mariannini, de Venise, sont, à ma connaissance, les plus complètes et les plus exactes. Voici le tableau de ses résultats. Les diverses dissolutions dont il se compose sont formées de 1 partie de la substance dans 100 parties d'eau distillée. La conductibilité de l'eau de mer est représentée par 100; les expériences ont été faites à 3 et à 6° de température.

Hydroxygène de soude.	50,96	Nitrate de potasse.	78,03
Acide hydroxygène.	18,27	Sulfate de potasse.	80,00
Ammoniaque liquide.	26,45	Sel marin.	84,79
Soude.	32,06	Sulfate acide d'alumine	
Phosphate de potasse.	44,74	et de potasse.	85,00
Baryte.	45,51	Acide citrique.	85,71
Phosphate de soude.	46,00	Acide acétique.	87,00
Tartrate de potasse et		Tartrate de potasse.	91,00
d'ammoniaque.	50,07	Acide tartarique.	98,66
Sulfate de zinc.	51,64	Hydrochlorate de chaux. 110	
Chlorate de baryte.	53,75	Acide phosphorique avec	
Potasse.	55,68	un peu d'acide phos-	
Chlorate de fer au mil-		phoreux.	127
lium.	56,55	Hydrochlorate d'ammo-	
Nitrate de chaux.	57,00	niaque ferriqueux.	136
Acétate de potasse.	59,02	Oxalate de potasse.	119
Nitrate de baryte.	60,00	Hydrochlorate d'ammo-	
Prométhiate de fer.	62,36	niaque.	150
Tartrate acide de potasse.	67,06	Acétate de cuivre.	134
Sulfate de magnésie.	67,06	Acide hydrochlorique.	164
Acétate de soude.	64,09	Acide oxalique.	176
Carbonate de potasse.	68,09	Acide sulfurique.	239
Chlorate de potasse.	66,07	Dichlorure de cuivre.	258
l'acide de soude.	69,63	Pictominate de mercure.	278
Acide benzoïque.	70,87	Nitrate d'argent.	294
Nitrate d'ammoniaque.	71,15	Hydrochlorate d'or.	507
Sulfate de soude.	74,02	Acide nitrique.	358
Bromate de potasse.	78,56	Hydrochlorate de platine.	415

Il paraît que la conductibilité de l'eau distillée serait seulement de 1 et celle de l'alcool de 0,323 (*Bulletin des Annales*, mars 1827, pag. 190).

428. *De l'inégale conductibilité de diverses substances pour les fluides électriques.* — On doit à M. Ermon cette expérience curieuse : quand une pile est isolée et qu'on observe par des électroscopes très sensibles les tensions égales qu'elle donne à chaque pôle, si l'on vient toucher le pôle positif avec un morceau de savon sec, la tension de ce pôle disparaît et l'électricité vitrée passe au sol ; il en est de même si l'on touche le pôle négatif ; mais la pile ayant repris sa charge, si l'on met le savon entre ses pôles, ni l'un ni l'autre fluide ne disparaît ; elle reste chargée comme si le savon était un corps isolant ; enfin, et ceci est encore plus remarquable, tandis que le savon est ainsi entre les pôles, si l'on vient le toucher avec une tige de métal, en un point quelconque de sa surface, le fluide résineux seul s'écoule dans le sol, et le fluide vitré semble alors arrêté sur le savon. Donc, dans ces circonstances, le savon est conducteur du fluide résineux et non conducteur du fluide vitré.

La flamme de l'alcool présente les mêmes phénomènes (M. Biot) ; seulement, pour elle, c'est le fluide résineux qui reste isolé.

429. *Propriétés que prennent les conducteurs métalliques placés, sous certaines conditions, dans le circuit de la pile.* — M. Aug. de La Rive a publié récemment (*Ann. de Phys. et de Chimie*, t. xxxvi, pag. 34) un mémoire intéressant dans lequel il fait connaître une propriété nouvelle des conducteurs métalliques. Nous regrettons de ne pouvoir donner ici que le résumé de son travail :

1°. Les corps solides qui ont servi de conducteurs à l'électricité acquièrent, quand ils sont placés dans les circonstances favorables, la propriété de donner lieu à un courant, propriété que l'on peut nommer *pouvoir électro-dynamique* ;

2°. Ces conducteurs ne peuvent acquérir et développer ce pouvoir que lorsqu'une portion du circuit renferme un liquide conducteur non métallique ;

3°. Les conducteurs liquides placés dans les mêmes circonstances ne sont pas susceptibles, comme les solides, d'acquiescer cette propriété ;

4°. Toutes les circonstances qui accompagnent la production du phénomène semblent conduire à la conséquence que le courant s'établit dans les conducteurs par une décomposition et recombinaison successive du fluide naturel de chaque molécule, et qu'il existe dans les conducteurs solides une force coërcitive qui peut les maintenir, pendant un temps plus ou moins long, dans l'état électrique qui leur a été imprimé par le passage du courant.

Les expériences se disposent de la manière suivante : On termine chaque pôle de la pile par un fil

en platine, et l'on fait passer le courant pendant quelques minutes dans un liquide conducteur ; ensuite, on peut toucher les fils de platine, les détacher, les enlever, les laver même, les couper, ou leur faire subir diverses actions mécaniques, et après cela les mettre chacun à l'une des extrémités du multiplicateur ; alors, si on les fait communiquer entre eux *directement*, on n'observe aucun effet ; si on les joint par un conducteur métallique, on n'observe rien encore ; mais si on les fait plonger l'un et l'autre dans une dissolution saline, à l'instant il se détermine un courant qui traverse le multiplicateur en se dirigeant du fil qui était au pôle positif au fil qui était au pôle négatif. Cette propriété peut se conserver dans les fils pendant plusieurs heures après qu'ils ont reçu l'action de la pile.

430. *Piles secondaires de Ritter.* — La propriété dont nous venons de parler semble avoir quelque liaison remarquable avec les piles que Ritter avait construites autrefois, peu de temps après la découverte du galvanisme, et que M. Marianini vient de soumettre à de nouvelles recherches. Ces piles sont simplement composées de disques d'un même

métal, alternant dans un ordre quelconque avec des rondelles humides de drap ou de carton. Lorsqu'on les expose pendant quelque temps entre les deux pôles d'une forte pile, elles se chargent et deviennent capables de reproduire à leur tour, mais avec une moindre intensité, tous les phénomènes des véritables piles : c'est pour cela qu'on les appelle des piles secondaires. Une fois qu'elles sont chargées, elles peuvent pendant long-temps conserver leurs propriétés ; et, suivant l'observation de M. Marianini, on peut alors intervertir l'ordre des disques, sans pour cela détruire leur activité. Le pôle positif des piles secondaires se trouve à l'extrémité qui touchait le pôle positif de la pile, et *vice-versa*, son pôle négatif correspond au fil négatif ; cette distribution n'est pas changée par le retournement des rondelles humides ; enfin, l'intensité électrique paraît proportionnelle au nombre des alternatives du métal et du conducteur intermédiaire.

Ces phénomènes curieux sont une mine nouvelle, et puisqu'elle est exploitée par MM. de La Rive et Marianini, nous pouvons être assurés qu'elle deviendra bientôt une mine féconde pour la science.

CHAPITRE VI.

DES PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-CHIMIQUES.

431. *De l'influence que l'état électrique des corps exerce sur leurs affinités chimiques.* — Le docteur Wollaston a démontré depuis long-temps qu'une lame métallique plongée dans un acide, ou dans une dissolution saline, n'éprouve pas les mêmes effets, si elle reste libre, ou si elle est touchée par une autre substance métallique, qui plonge aussi dans le liquide. (*Annales de Chimie*, t. XVI, page 45). Par exemple, en tenant un fil ou une lame de zinc dans une éprouvette remplie d'acide sulfurique très étendu, on n'observe qu'une faible action chimique ; si l'on y plonge en même temps un fil de platine ou d'argent, le phénomène reste le même, et le nouveau métal n'éprouve aucun effet ; mais si l'on établit à l'extérieur le contact entre les deux métaux plongés, l'action chimique prend à l'instant une vive intensité : les bulles d'hydrogène vont se dégager en foule sur le platine ou l'argent, et le zinc s'oxide beaucoup plus vite. On peut faire une expérience semblable avec le cuivre et le zinc ; et, en général, un métal seul, même quand il n'aurait pas d'action sur le liquide dans lequel il plonge, peut souvent en prendre une, par son contact avec un autre métal.

Les espèces de végétations curieuses, connues

sous les noms d'*arbre de Saturne*, d'*arbre de Diane*, etc., reposent exactement sur le même principe, comme M. Grotthuss l'a démontré dans un Mémoire très intéressant et rempli de vues ingénieuses (*Ann. de Chim.*, t. LXIII, pag. 1). On sait que l'arbre de Saturne se forme dans une dissolution d'acétate de plomb ; cette dissolution étant contenue dans un flacon à grand goulot, on fixe au bouchon du flacon une lame de zinc, qui plonge dans le liquide à une certaine profondeur ; l'appareil étant ensuite abandonné à lui-même, l'opération s'accomplit lentement, et, après quelques jours, on observe un arbre brillant composé de paillettes de plomb revivifié ; il semble prendre racine sur le zinc, et de là il s'étend dans le flacon en ramifications singulières. Pendant la revivification du plomb, il y a oxidation du zinc ; ainsi, à l'instant où une paillette métallique se dépose à l'extrémité d'un rameau pour lui donner un nouvel accroissement, l'oxygène qu'elle a quitté va se précipiter sur le zinc pour se combiner avec lui. Le zinc et le plomb, déjà revivifiés, forment donc une véritable pile qui décompose l'acétate et l'oxide de plomb, attirant le métal au pôle négatif, et l'oxygène au pôle positif.

Les mêmes principes expliquent la formation

de l'arbre de Diane, que l'on obtient en versant sur du mercure une dissolution de nitrate d'argent suffisamment concentrée. Ils expliquent pareillement les ramifications brillantes que l'on obtient aussi en plongeant une lame du zinc dans une dissolution d'hydrochlorate d'étain.

432. *Corrosion du cuivre des vaisseaux.* — Presque tous les métaux éprouvent des altérations plus ou moins profondes, lorsqu'ils sont exposés à l'influence de l'air ou de l'humidité, ou à l'influence encore plus destructive de l'eau de mer; ils sont, avec le temps, oxydés, corrodés et complètement dénaturés. Ces effets nous semblent naturels parce que nous les voyons se reproduire sans cesse; et nous disons que tout s'use et se détruit avec le temps, sans prendre garde que toute destruction est un phénomène chimique aussi bien que toute reproduction. Il appartenait donc à la chimie d'expliquer toutes ces altérations lentes ou rapides, auxquelles sont exposés les métaux, et nous pouvons dire aujourd'hui qu'elle fait mieux que de les expliquer, puisqu'elle donne des moyens efficaces pour les prévenir ou du moins pour les atténuer. On a remarqué souvent que des barres de fer placées dans les mêmes lieux et sous les mêmes influences se détruisent très inégalement; qu'il en est de même des couvertures en zinc ou en plomb; et de même aussi des lames de cuivre qui forment le doublage des vaisseaux. Le Conseil de l'Amirauté ayant appelé l'attention de la Société Royale de Londres sur cette importante question, sir H. Davy est parvenu à en donner une solution qui ne paraît pas moins utile pour les arts qu'elle est féconde pour la science. Sir H. Davy attribue la corrosion du cuivre qui double les vaisseaux à l'état électrique, dans lequel ce métal se constitue par son contact avec l'eau de mer. Il s'oxyde aux dépens de l'eau, et forme ensuite des carbonates ou d'autres sels; donc il agit comme le pôle positif d'une pile qui attire à lui l'oxygène; ainsi, en donnant au cuivre un état électrique négatif suffisamment énergique, il ne pourra plus s'oxyder, et s'il arrive encore qu'il décompose l'eau et les sels, c'est l'hydrogène qui se portera sur lui, ou les substances alcalines résultant de la décomposition. Telle est en peu de mots la théorie de sir H. Davy. Or, n'est-il plus facile que de rendre le cuivre électro-négatif; il suffit pour cela de le toucher avec un métal qui soit électro-positif avec lui; le zinc pourrait remplir cette condition, mais le fer et la fonte le remplissent encore mieux et plus économiquement. En effet, si l'on applique sur le cuivre, à la proue et à la poupe du vaisseau, des lames de fer ou de fonte de dimensions convenables, ces lames s'oxydent et peuvent être remplacées facilement; mais le cuivre est protégé, l'eau n'a plus de prise sur lui, et il peut parcourir les mers sans perdre son éclat métallique; seulement il y a une proportion à garder entre la surface totale du cuivre et la surface des lames qui

le protègent; si les plaques de fonte offrent une surface trop petite, la corrosion du cuivre est seulement diminuée; si elles offrent une surface trop grande, le cuivre prend alors une trop grande puissance négative, il se décompose en *sens inverse* l'eau de mer et les sels qu'elle contient, et bientôt sa surface est couverte de dépôts terreux qui deviennent un grand obstacle à la marche rapide du bâtiment, à cause des plantes et des coquillages nombreux qui viennent s'y attacher.

Après diverses expériences faites sur des vaisseaux qui ont parcouru les mers équatoriales ou les mers polaires, sir H. Davy conseille de donner aux lames de fer une surface qui soit la 250^e partie ou 1/250 de la surface de cuivre qu'il s'agit de protéger.

On conçoit qu'il n'est pas nécessaire que le cuivre soit en contact immédiat avec le métal protecteur; il suffit seulement qu'il n'en soit séparé que par un conducteur assez parfait. Ainsi le cuivre est préservé par du zinc dont il est séparé par un fil d'argent de 40 pieds de long et d'environ 1/1000 de pouce de diamètre; il pourrait même en être séparé par du charbon, du coton ou de la filasse imprégné d'eau de mer.

Il devient facile, de cette manière, de faire une expérience curieuse qui montre bien l'origine et le développement de la force préservatrice. On prend plusieurs vases remplis d'eau de mer, que l'on fait communiquer entre eux par de la filasse dont les faisceaux ont environ 1/5 de pouce d'épaisseur. Dans le premier, on met un fil de cuivre roulé en spirale et attaché à un morceau de zinc; dans le second et les suivants, on met du fil pareil qui ne touche aucun autre métal, et alors on observe divers phénomènes. Le cuivre du premier vase est rapidement couvert de dépôts alcalins, de cristaux de carbonate de soude et même de paillettes de zinc revivifié; celui du deuxième est moins chargé de dépôts; celui du troisième conserve à peu près son état naturel; celui du quatrième éprouve au commencement de corrosion; et celui du cinquième vase et des vases suivants est complètement altéré; la force protectrice ne s'étend pas jusqu'à lui.

Voici une autre expérience qui est aussi très digne d'attention. Une tige de fer et une tige de cuivre sont en communication par de bons conducteurs; on les plonge chacune dans un vase d'eau de mer, et ces deux vases communiquent entre eux par de la filasse humide; quelques gouttes de potasse versées dans le vase de fer diminuent le pouvoir négatif de l'autre vase, car le dépôt de carbonate de chaux et de magnésie devient moins abondant; quelques gouttes de plus le rendent tout-à-fait nul, et l'équilibre chimique s'établit en même temps que l'équilibre électrique. Enfin, si l'on continue de verser encore un peu de solution alcaline, c'est le fer qui devient négatif et le cuivre positif, comme on en peut juger par la teinte

verte que prend l'eau du vase qui le contient, et par la rapide corrosion qu'il éprouve.

Ces résultats sont une preuve assez frappante de l'influence que l'état électrique des corps peut exercer sur leurs affinités mutuelles, et sur la nature des combinaisons qu'elles produisent; et quand on sait qu'il y a une force électro-motrice au contact de toutes les substances hétérogènes, que son intensité est sans cesse variable avec la température, et que la conductibilité peut répandre instantanément, jusqu'à de grandes distances, les fluides électriques qu'elle développe, on conçoit que dans un assemblage de corps conducteurs, tous les phénomènes électriques qui se développent en un point peuvent modifier de mille manières les affinités chimiques et les combinaisons qui doivent s'accomplir dans un autre point quelconque du système.

433. *De l'usage du multiplicateur pour découvrir l'électricité qui se développe dans les combinaisons et dans toutes les affinités moléculaires.* — M. Avogadro est le premier, à ma connaissance, qui ait découvert, au moyen du multiplicateur, l'électricité qui se développe pendant les actions chimiques; ses expériences ont été répétées et développées par M. Ørsted, et ensuite par un grand nombre de physiciens.

Lorsqu'on plonge les deux fils du multiplicateur dans un acide, ou en général dans un liquide capable d'exercer sur eux quelque action chimique, on observe dans l'aiguille une agitation qui révèle l'existence d'un courant électrique plus ou moins fort. Au premier instant, la direction du courant paraît fixe et déterminée; mais si l'expérience se prolonge un peu long-temps, on voit le pôle austral de l'aiguille se tourner tantôt à l'orient, tantôt à l'occident, et il serait difficile de reconnaître dans ces alternatives des périodes régulières. Plusieurs physiciens ont cru pouvoir assurer que la direction du courant devient constante dès qu'on établit quelque inégalité constante de température ou de surface entre les parties des fils qui plongent dans le liquide; mais, dans des expériences très nombreuses, il m'a été impossible de reconnaître une fixité absolue dans cette loi; la circonstance qui me paraît la plus sûre et la plus décisive pour imprimer au courant une direction déterminée, est que l'un des fils soit maintenu en repos, tandis que l'autre est agité dans le liquide.

Pour étudier les effets des différens métaux, il suffit de les ajuster successivement aux deux extrémités des fils du multiplicateur, avec la précaution d'établir les contacts sensiblement de la même manière, et par des surfaces bien décapées; ainsi pour observer les effets de l'étain, on prend deux lames parcelles de ce métal, et on en attache une à chaque extrémité du multiplicateur. Dans tous les cas l'action chimique donne naissance à un courant, dont on peut facilement constater l'intensité;

mais il reste souvent quelque incertitude sur sa direction.

Puisqu'il y a un courant dans le multiplicateur, il faut de toute nécessité qu'il ait son origine à l'un ou à l'autre des fils qui reçoivent l'action chimique; et puisque cette action est la même sur les deux, à l'intensité près, il est probable que ce que nous observons est seulement la différence des effets produits sur chacun d'eux. Mais cette différence est suffisante pour nous faire voir d'une manière non douteuse que les molécules ne peuvent pas se combiner sans produire ou sans absorber de l'électricité; c'est-à-dire que l'équilibre moléculaire ne peut être troublé sans que l'équilibre électrique ne le soit pareillement. Ce principe a été confirmé dans toute sa généralité par les recherches ingénieuses d'un grand nombre de physiciens, et surtout par celles de M. Becquerel et de M. Nobili.

434. *De l'électricité qui se développe dans les actions chimiques des gaz et des conducteurs imparfaits.* — Le multiplicateur est l'instrument le plus délicat pour accuser la présence de l'électricité dans les combinaisons des métaux et dans celles des liquides; mais pour les combinaisons d'une autre nature, il faut nécessairement avoir recours à d'autres appareils. Dans les recherches nombreuses que j'ai faites sur la combinaison des gaz, et sur celles des conducteurs imparfaits, j'ai toujours donné la préférence au condensateur qui est représenté dans la figure 326. MM. Lavoisier et Laplace, Volta, de Saussure et sir H. Davy avaient déjà employé le même moyen, mais à une époque où l'état de la science ne permettait pas de démêler avec certitude toutes les circonstances qui peuvent modifier les phénomènes électriques des combinaisons. Mes expériences avaient pour objet la recherche des principales causes qui peuvent donner naissance à l'électricité atmosphérique; ainsi je n'en donnerai le détail que dans les *Éléments de Météorologie*; mais, pour me conformer à mon plan, il est nécessaire d'indiquer ici les conséquences auxquelles j'ai été conduit. Il résulte de mes expériences :

1°. Que les gaz dégagent de l'électricité lorsqu'ils se combinent, soit entre eux, soit avec les corps solides ou liquides.

2°. Que, dans ces combinaisons, l'oxygène dégage toujours l'électricité positive, et le corps combustible, quel qu'il soit, l'électricité négative.

3°. Que, réciproquement, quand une combinaison se défit, chacun des élémens, manquant alors de l'électricité qu'il avait dégagée, se trouve dans un état électrique opposé. Cette réciprocité montre en quoi l'état naissant diffère de l'état définitif d'un corps.

4°. Que l'action des végétaux sur l'oxygène de l'air est une des causes les plus permanentes et les plus puissantes de l'électricité atmosphérique; car

si l'on considère, d'une part, qu'un gramme de charbon pur, en passant à l'état d'acide carbonique, dégage assez d'électricité pour charger une bouteille de Leyde, et, d'une autre part, que le charbon qui est engagé dans la constitution des végétaux ne donne pas moins d'électricité que le charbon qui brûle librement, on peut conclure, comme mes expériences directes tendent à l'établir, que sur une surface en végétation de 100 mètres carrés, il se produit en un jour plus d'électricité vitrée qu'il n'en faudrait pour charger la plus forte batterie électrique.

5°. Que le changement d'état des corps ne donne jamais la moindre trace d'électricité.

6°. Que les solutions faibles et concentrées des sels solides, tels que la strontiane, la chaux, la baryte, etc., donnent de l'électricité par la séparation chimique qui accompagne l'évaporation. La vapeur d'eau qui s'exhale prend l'électricité résineuse, et la solution restante, ou le dépôt d'alcali, prend l'électricité vitrée.

7°. Que les solutions faibles en concentrées des

gaz, des acides, ou des sels, donnent pareillement de l'électricité par la ségrégation chimique qui accompagne l'évaporation; mais pour ces corps, c'est, au contraire, la vapeur d'eau qui prend l'électricité vitrée, et la solution restante l'électricité résineuse.

8°. Que les eaux qui couvrent la surface de la terre, qui humectent le sol, ou qui imbibent les plantes, perdant toujours en dissolution quelques substances étrangères qu'elles abandonnent par l'évaporation, toutes les vapeurs qu'elles produisent sont constituées dans un état électrique vitré ou résineux, à l'instant même où elles prennent naissance, et en s'élevant elles répandent et dispersent dans toute la masse atmosphérique les électricités dont elles sont chargées.

Si ces causes ne sont pas les seules qui agissent pour renouveler sans cesse l'électricité de l'atmosphère, elles sont du moins les causes les plus influentes, puisqu'elles sont par leur intensité en rapport avec la grandeur des phénomènes que l'on observe.

CHAPITRE VII.

DES POISSONS ÉLECTRIQUES.

435. Il existe plusieurs poissons qui ont la propriété singulière de produire une vive secousse et un engourdissement profond dans la main qui les touche : la *torpille*, qui se trouve abondamment dans la mer Méditerranée, sur les côtes occidentales de France, et même sur les côtes d'Angleterre, est, sous ce rapport, l'un des poissons les plus énergiques de nos climats. Lorsqu'en veut la prendre avec la main, on reçoit un choc violent, sans qu'elle paraisse se donner aucun mouvement, et quelquefois le bras est frappé jusqu'à l'épaule d'une paralysie douloureuse qui dure plusieurs minutes, ou plutôt d'un frémissement pareil à celui qu'en éprouve quand on se frappe le coude. C'est ainsi du moins que s'expliquent les observateurs qui ont par eux-mêmes éprouvé ces effets, et ils ajoutent qu'après un premier choc on n'est pas tenté d'en recevoir immédiatement un second, quelque zèle que l'on ait pour la recherche de la vérité. Aussi la torpille est l'effroi des pêcheurs, et l'on juge aisément que, si elle a été pour eux l'objet d'une foule de traditions merveilleuses, elle a dû être aussi pour les naturalistes et pour les physiciens un sujet d'étude fort intéressant. Autrefois on expliquait les propriétés de la torpille en disant qu'elle était douée d'une propriété *torporifique*; plus tard on a supposé qu'elle lançait des molécules

engourdissantes; cependant Réaumur, dans un mémoire curieux sur ce sujet (*Acad. des Sciences*, 1714), essaya de réfuter cette explication et de démontrer que l'organe de la torpille se déboude comme un ressort et produit des effets pareils à ceux que l'on recevrait en touchant un corps sonore qui vibre violemment. A cette époque la bouteille de Leyde n'était pas inventée; et dès que Muschenbroek en eut ressenti les effets, il eut l'heureuse idée de comparer la secousse que donne la torpille à une véritable commotion électrique, et de l'attribuer à la même cause. C'est alors que la torpille et les autres poissons analogues, que l'en appelait en général des *trembleurs*, furent appelés des *poissons électriques*. Maintenant on connaît avec certitude sept poissons électriques : *Torpedo narko rissa*, *T. unimaculata*, *T. marmorata*, *T. Galvani*, *Silurus electricus*, *Tetraodon electricus*, *Gymnotus electricus*. M. Geoffroy-Saint-Hilaire, qui a publié un travail important sur les poissons électriques (cinquième cahier des *Annales du Muséum d'histoire naturelle*), pense qu'ils appartiennent tous à des genres différents et qu'ils offrent chacun dans leur genre l'organisation la plus complète, sans blesser en rien l'ordre des rapports naturels. Nous nous bornerons ici à indiquer les principales propriétés de la torpille et de

gymnote, qui sont, parmi les poissons électriques, ceux qui ont été l'objet du plus grand nombre de recherches.

436. *Propriétés de la torpille.* — C'est à Walsh que nous devons les premières recherches un peu précises sur les effets de la torpille; ses expériences furent faites à La Rochelle en 1772 et à l'île de Ré (*Journal de physique*, t. IV, pag. 205); et il en tire les conséquences suivantes :

Quand la torpille est dans l'air, en reçoit la commotion en touchant directement une partie quelconque de sa peau, soit par un seul doigt, soit par toute la largeur de la main.

On reçoit pareillement les commotions lorsqu'en la touche avec un bon conducteur; par exemple, avec une tige de métal de plusieurs pieds de longueur.

La commotion est arrêtée par tous les mauvais conducteurs; ainsi, on peut toucher impunément la torpille avec du verre, de la résine, etc.

On peut même la toucher sans danger avec une petite bande d'étain collée sur du verre, pourvu qu'il se trouve dans l'étain une solution de continuité aussi petite qu'en puisse la faire avec la pointe d'un caëfil.

Quand plusieurs personnes non isolées se tiennent par la main, et que la première, seule, touche la torpille, la commotion se fait sentir à la seconde et même à la troisième, mais elle diminue d'intensité.

La commotion se fait sentir dans un cercle de vingt personnes non isolées qui se tiennent par la main, quand la première personne touche la torpille sous le ventre, tandis que la dernière la touche sur le dos, ou *vice versa*.

Voilà les principaux résultats que l'on obtient dans l'air; la dernière expérience réussirait peut-être en touchant deux points quelconques qui ne soient pas opposés, comme Walsh semble l'exiger, sans doute à cause de l'analogie qu'il cherche à établir entre les bouteilles de Leyde et les torpilles. Dans l'eau, les commotions ont toujours moins d'intensité que dans l'air; mais elles se produisent encore de la même manière et sous les mêmes conditions. L'eau étant un assez bon conducteur, on conçoit qu'une torpille vive et énergique puisse agir à distance, et qu'alors il ne soit pas nécessaire de la toucher directement. Walsh a en effet observé qu'elle foudroie à distance de petits poissons, ou au moins qu'elle les étourdit ou les enivre.

Dans tous les cas, la commotion que lance la torpille est pour elle un phénomène volontaire; il arrive souvent qu'en la touchant à plusieurs reprises sans rien obtenir; mais lorsqu'on l'irrite en lui pinçant les nageoires, ou de quelque autre manière, en est à peu près assuré de recevoir des coups redoublés; Walsh a compté jusqu'à cinquante décharges en une minute. A chaque coup son corps reste parfaitement immobile; mais en observe dans

ses yeux et dans les nageoires pectorales un mouvement particulier, et dans l'organe électrique lui-même une sorte de compression, qui sont des marques sûres qu'elle est au moment d'agir.

Il était curieux d'essayer les effets de la torpille sur le multiplicateur de Schweiger, afin de constater encore d'une manière plus certaine les rapports de ces phénomènes avec les décharges électriques. Au mois d'août 1828, M. de Blainville a fait à La Rochelle, avec M. Fleureau de Bellevue, quelques expériences de cette nature, et l'aiguille a pirouetté de plus d'une demi-circonférence quand on a planté dans l'organe électrique les deux aiguilles qui terminaient les fils du multiplicateur.

437. *Propriétés du gymnote.* — Le gymnote électrique, que l'on appelle aussi l'*anguille de Surinam*, est doué d'une puissance électrique encore plus grande que celle de la torpille. Walsh fit venir de Surinam des gymnotes, sur lesquels il confirma les résultats qu'il avait obtenus de la torpille quelques années auparavant; mais, de plus, il fit cette observation curieuse, que la commotion du gymnote peut se transmettre d'un conducteur à un autre au travers d'une petite lame d'air, et qu'alors on voit briller une étincelle électrique. (*Journ. de Phys.*, t. VIII, p. 305.)

M. de Humboldt a fait, en Amérique, avec M. Bonpland, un grand nombre d'expériences importantes sur le gymnote. Voici ce qu'il rapporte, dans son ouvrage, des habitudes de ce poisson singulier et des moyens de le pêcher.

« Nous partîmes, le 9 mars, de grand matin, pour le petit village de *Rastro de Abaza*: de là, les Indiens nous conduisirent à un ruisseau qui, dans le temps des sécheresses, forme un bassin d'eau bourbeuse entouré de beaux arbres, de cécilia, d'amyrin et de mimosa à fleurs odoriférantes. La pêche des gymnotes avec des filets est très difficile, à cause de l'extrême agilité de ces poissons, qui s'enfouissent dans la vase comme des serpents. On ne voulut point employer le *barbacou*, c'est-à-dire les racines du *piscidia erithryna*, du *jaduvinia armillaris* et de quelques espèces de *phyllanthus* qui, jetées dans une mare, enivrent et engourdissent les animaux: ce moyen aurait affaibli les gymnotes. Les Indiens nous disaient qu'ils allaient pêcher avec des chevaux. Nous eûmes de la peine à nous faire une idée de cette pêche extraordinaire; mais bientôt nous vîmes nos guides revenir de la savane, où ils avaient fait une battue de chevaux et de mulets non domptés. Ils en amenèrent une trentaine qu'on força d'entrer dans la mare.

« Le bruit extraordinaire causé par le piétinement des chevaux, fait sortir les poissons de la vase et les excite au combat. Ces anguilles, jaunâtres et livides, semblables à de grands serpents aquatiques, nagent à la surface de l'eau, et se pressent sous le ventre des chevaux et des mulets. Une lutte entre des animaux d'une organisation si

différente offre le spectacle le plus pittoresque. Les Indiens, munis de harpons et de roseaux longs et minces, ceignent étroitement la mare; quelques-uns d'entre eux montent sur les arbres, dont les branches s'étendent horizontalement au-dessus de la surface de l'eau. Par leurs cris sauvages et la longueur de leurs jongs, ils empêchent les chevaux de se sauver, en atteignant la rive du bassin. Les anguilles, étourdies du bruit, se défendent par la décharge répétée de leurs batteries électriques. Pendant long-temps elles ont l'air de remporter la victoire. Plusieurs chevaux succombent à la violence des coups invisibles qu'ils reçoivent de toute part dans les organes les plus essentiels à la vie; étourdis par la force et la fréquence des commotions, ils disparaissent sous l'eau. D'autres, haletant, la crinière hérissée, les yeux hagards, et exprimant l'angoisse, se relèvent et cherchent à fuir l'orage qui les surprend. Ils sont repoussés par les Indiens au milieu de l'eau; cependant un petit nombre parvient à tromper l'active vigilance des pêcheurs. On les voit gagner la rive, broncher à chaque pas, s'étendre dans le sable excédés de fatigues et les membres engourdis par les commotions électriques des gymnotes.

« En moins de cinq minutes, deux chevaux étaient noyés. L'anguille, ayant cinq pieds de long et se pressant contre le ventre des chevaux, fait une décharge de toute l'étendue de son organe électrique. Elle attaque à la fois le cœur, les viscères et le *plexus cardiacus* des nerfs abdominaux. Il est naturel que l'effet qu'éprouvent les chevaux soit plus puissant que celui que le même poisson produit sur l'homme lorsqu'il ne le touche que par une des extrémités. Les chevaux ne sont probablement pas tués, mais simplement étourdis. Ils se noient, étant dans l'impossibilité de se relever, par la lutte prolongée contre les autres chevaux et les gymnotes.

« Nous ne doutons pas que la pêche ne se terminât par le mort successive des animaux qu'on y emploie; mais peu à peu l'impétuosité de ce combat inégal diminue; les gymnotes, fatigués, se dispersent. Ils ont besoin d'un long repos et d'une nourriture abondante pour réparer ce qu'ils ont perdu de force galvanique. Les malets et les chevaux paraissent moins effrayés; ils ne hérissent plus la crinière; leurs yeux expriment moins d'épouvante. Les gymnotes s'approchaient timidement du bord des marais, où on les prit au moyen de petits harpons attachés à de longues cordes. Lorsque les cordes sont bien sèches, les Indiens, en soulevant le poisson dans l'air, ne ressentent point de commotions. En peu de minutes nous eûmes cinq grandes anguilles, dont la plupart n'étaient que légèrement blessées. D'autres furent prises vers le soir par le même moyen.

« La température des eaux dans lesquelles vivent habituellement les gymnotes est de 20° à 27°. On assure que leur force électrique diminue dans

les eaux plus froides; et il est assez remarquable, en général, comme l'a déjà observé un physicien célèbre, que les animaux doués d'organes électromoteurs, dont les effets deviennent sensibles à l'homme, ne se rencontrent pas dans l'air, mais dans un fluide conducteur de l'électricité. Le gymnote est le plus grand des poissons électriques; j'en ai mesuré qui avaient cinq pieds à cinq pieds trois pouces de long. Les Indiens assuraient qu'ils en avaient vu de plus grands encore. Nous avons trouvé qu'un poisson qui avait trois pieds dix pouces de long pesait douze livres. Le diamètre transversal du corps était (sans compter la nageoire anale, qui est prolongée en forme de carène) de trois pouces cinq lignes. Les gymnotes du *Cana de Bera* sont d'un beau vert d'olive. Le dessous de la tête est jaune, mêlé de rouge. Deux rangées de petites taches jaunes sont placées symétriquement le long du dos, depuis la tête jusqu'au bout de la queue. Chaque tache renferme une ouverture excrétoire: aussi la peau de l'animal est constamment couverte d'une matière mucqueuse, qui, comme Volta l'a prouvé, conduit l'électricité vingt à trente fois mieux que l'eau pure. Il est, en général, assez remarquable qu'aucun des poissons électriques découverts jusqu'ici dans les différentes parties du monde ne soit couvert d'écaillés.

En opérant sur ces poissons, dont les batteries sont si puissantes, M. de Humboldt n'a pu découvrir aucune action directe sur les électromètres les plus sensibles, et aucun phénomène de lumière électrique.

438. *De l'organe électrique.* — Dans les divers poissons électriques, l'organe qui développe l'électricité a sensiblement la même texture et les mêmes apparences, quoique différent par sa forme, par sa grandeur et par sa disposition. Nous essaierons seulement de donner une idée de l'organe de la torpille, qui a été l'objet des recherches les plus précises. Cet organe se divise en deux parties symétriquement placées de chaque côté de la tête et appuyées contre les branchies; elles occupent l'une et l'autre toute l'épaisseur qui sépare les deux plis de la peau. Lorsqu'on en fait la dissection, on voit qu'il est composé d'un tissu cellulaire extrêmement lâche, à grandes mailles, qui affecte la forme d'un cylindre ou plutôt d'un prisme à cinq à six pans. On en fait une comparaison sensiblement exacte, en disant qu'il ressemble aux alvéoles d'un rayon de miel, seulement les cloisons ne sont pas de minces membranes, mais plutôt des fibres, séparées et tendues dans des sens différents.

On compte ordinairement dans chaque organe quatre à cinq cents de ces petits prismes, et il paraît que Hunter en a compté une fois jusqu'à onze cent quatre-vingt-doux. Ils sont à peu près perpendiculaires à la direction de la peau, à laquelle ils sont fortement adhérens par leurs deux extrémités. Si l'on observe en détail la structure

de chacun de ces prismes, on y distingue une foule de lames minces perpendiculaires aux arêtes, séparées l'une de l'autre et ajustées enfin comme les divers élémens d'une pile. Ces petits feuillets distincts, tantôt plans, tantôt ondulés, sont séparés par des couches muqueuses très adhérentes; mais en pressant un organe on ne peut faire sortir aucune quantité sensible de fluide.

Quatre faisceaux nerveux d'un grand volume viennent se distribuer dans l'organe; le premier

venant de la cinquième paire, et les trois autres de la huitième; en outre, on observe un appareil qui suppose une très active circulation.

Cette organisation a certainement des rapports frappans avec les piles de Volta; mais il faudrait des observations anatomiques plus précises, des expériences physiques et physiologiques plus nombreuses, pour porter jusqu'à l'évidence ces analogies qui se présentent d'une manière si séduisante.

FIN DU LIVRE CINQUIÈME.

LIVRE SIXIÈME.

DES ACTIONS MOLÉCULAIRES.

439. Un corps organique ou inorganique peut être considéré comme un système en équilibre; ses parties constitutantes ou ses molécules les plus rapprochées restent séparées par des intervalles plus ou moins grands, et cependant à ces distances elles agissent sans cesse les unes sur les autres, pour se maintenir dans leurs positions respectives, pour s'attirer ou se repousser, ou enfin pour se communiquer les efforts et les pressions qu'elles supportent. Ce sont ces actions mutuelles des molécules, que l'on appelle en physique, *actions moléculaires*. Il serait difficile d'établir une distinction entre ces forces et les forces chimiques, qui agissent pareil-

lement, aux mêmes distances, sur toutes les molécules de la matière; mais on peut dire que les actions chimiques tendent à produire les corps et à les constituer dans un état déterminé d'équilibre ou d'agréation, tandis que les actions moléculaires proprement dites tendent à conserver les corps, ou à les retenir dans l'état d'équilibre ou d'agréation qu'ils ont reçu. Considérées sous ce point de vue, les actions moléculaires comprennent encore un champ assez vaste pour qu'il soit nécessaire d'y établir quelques divisions. Ainsi nous étudierons, dans des chapitres séparés, la *capillarité*, la *structure des corps* et l'*élasticité*.

CHAPITRE PREMIER.

CAPILLARITÉ.

440. Lorsqu'on fait tremper dans un liquide, l'extrémité inférieure d'un tube de verre (Fig. 422 et 423), on remarque que la colonne liquide qui pénètre dans ce tube, ne s'arrête presque jamais au niveau extérieur. Dans certains liquides, dans l'eau, par exemple, elles s'élèvent au-dessus (Fig. 422), et dans le mercure, au contraire, elle s'abaisse au-dessous (Fig. 423). Ces phénomènes singuliers d'*ascension* ou de *dépresseion*, doivent être désignés par un nom spécial, parce qu'ils semblent échapper aux lois générales de l'équilibre des fluides, et dès leur découverte ils furent appelés *phénomènes capillaires*, parce qu'on les observa d'abord dans des tubes étroits dont les diamètres intérieurs étaient sans doute comparés à l'épaisseur d'un cheveu, ou peut-être même au diamètre du petit canal régulier et constant que présentent les cheveux dans le sens de leur longueur. La force ou la cause qui produit ces phénomènes, a été appelée tantôt *action capillaire*, tantôt *attraction capillaire*; mais aujourd'hui on s'accorde à l'appeler simplement *capillarité*.

Cette force n'agit pas seulement pour élever ou déprimer les petites colonnes liquides dans l'inté-

rieur des tubes, nous verrons qu'elle s'exerce sans cesse au contact des liquides avec les solides, au contact des liquides entre eux ou des solides entre eux, et en général au contact de toutes les parcelles les plus ténues de la matière pondérable.

441. Les hauteurs des colonnes soulevées ou déprimées dans les tubes sont en raison inverse de leurs diamètres.

Il est facile de reconnaître par l'expérience qu'en général les différences de niveau sont d'autant plus grandes que les diamètres des tubes sont plus fins. On voit, par exemple (Fig. 424), quatre tubes en syphon, dont les deux premiers contiennent de l'eau, leurs larges branches a et a' sont égales, mais leurs branches étroites b et b', sont l'une de 1 millimètre, et l'autre de 1/2 millimètre environ, et dans celui-ci l'élévation est à peu près double; il en est de même pour le 3^e et le 4^e tube, qui contiennent du mercure, et dont les branches étroites ont pareillement, l'une 1 millimètre, et l'autre 1/2 millimètre de diamètre. Celui-ci offre une dépression presque double. Cependant, pour établir cette loi fondamentale sur des expériences précises, il faut avoir recours à d'autres appareils et à

d'autres moyens d'observation. C'est M. Gay-Lussac qui nous servira de guide dans cette recherche, car on peut dire qu'avant lui les observateurs les plus habiles n'avaient obtenu que des résultats tout-à-fait discordants, lorsqu'ils avaient voulu déterminer les différences absolues de niveau des divers liquides dans des tubes de dimensions connues.

Remarquons d'abord que toutes les fois qu'il y a *ascension* dans un tube capillaire assez étroit, le sommet de la colonne liquide prend et conserve une forme particulière qui est représentée et fort amplifiée dans la figure 433; c'est *exactement* une demi-sphère creuse dont le diamètre est le diamètre du tube lui-même; on l'appelle un *menisque concave*. Au contraire quand il y a *dépression*, le sommet de la colonne liquide prend et conserve la forme d'une demi-sphère pleine, dont le diamètre est encore le diamètre du tube (Fig. 434); on l'appelle un *menisque convexe*. Ces formes sont essentiellement liées à l'ascension et à la dépression, car si l'on enduit de quelques corps gras, la surface intérieure d'un tube de verre, et qu'on en plonge l'extrémité dans de l'eau colorée, on observe que non-seulement l'eau cesse de s'élever au-dessus du niveau, mais qu'elle reste *déprimée* dans ce tube enduit de graisse, et qu'en même temps le sommet de la colonne prend la forme du *menisque convexe*, comme fait le mercure dans les tubes ordinaires. Il résulte de cette observation que les *différences de niveau dépendent de la forme du menisque*, et qu'ainsi toutes les causes accidentelles qui pourraient empêcher celui-ci de prendre la forme exacte qu'il doit avoir, empêcheraient aussi, par cela même, le liquide de parvenir à la hauteur précise à laquelle il doit trouver la stabilité de son équilibre. En effet, lorsqu'on plonge dans l'eau un tube dont la surface intérieure semble même très nette, on observe presque toujours des *dentelures* plus ou moins marquées sur les bords du menisque, et si l'on répète l'expérience à diverses époques, avec de l'eau pure, en mesurant à chaque fois la hauteur à laquelle s'élève la colonne, on trouve des nombres fort discordants, qui diffèrent souvent du simple au double.

Avec de telles irrégularités aucune comparaison n'est possible, et aucune loi ne peut être établie sur des bases certaines. Pour remédier à cet inconvénient, il faut, avant tout, faire passer dans le tube des acides ou de l'alcool, suivant la nature des impuretés dont il peut être souillé, puis le laver soigneusement, et enfin le *moniller* dans toute sa longueur, avec le liquide sur lequel on veut faire des expériences, si ce liquide est en effet de nature à le moniller. C'est par ces précautions minutieuses, et par beaucoup d'autres encore, que M. Gay-Lussac est parvenu à des résultats comparables. Quant au diamètre des tubes, on le détermine par le poids du mercure qu'ils peuvent contenir, ou seulement

par le poids d'une colonne de mercure qui occupe sur leur longueur un espace déterminé.

Voici maintenant l'appareil de M. Gay-Lussac. *r r'* (Fig. 447) est une large éprouvette fixée sur un pied à vis calantes, afin que son bord supérieur *a* n'ait pu être rendu horizontal. Le liquide qu'elle contient s'élève jusqu'à *a*; le tube capillaire *r s* est monté sur une plaque *q* qui se pose sur le bord de l'éprouvette; au moyen d'une coulisse verticale *c*, le tube peut monter ou descendre. À côté de l'éprouvette, à quelques poncees de distance, est une règle verticale *a*, sur laquelle se meut une lunette *l*, d'abord à frottement, et ensuite au moyen d'une vis de rappel pour les petits mouvements. Pour mesurer la hauteur *s* *a* de la colonne, on fait d'abord mouvoir la lunette jusqu'à ce que son fil micrométrique horizontal semble raser le sommet *s*; ensuite, écartant la plaque *q* vers les bords de l'éprouvette, on place à côté d'elle la pièce *a* *a'*, et après l'avoir ajustée, on tourne la tige à vis *o* jusqu'à l'instant où elle effleure la surface *u* du liquide; ensuite on enlève un peu de liquide avec une pipette ou autrement, et notant le point de départ de la lunette, on la fait descendre peu à peu, jusqu'à ce que la pointe de la tige tombe sous le fil; l'étendue de sa course est la hauteur du liquide au-dessus du niveau.

Le tableau suivant contient la moyenne des résultats auxquels M. Gay-Lussac a été conduit.

Noms des mélanges.	Densité.	Température en degrés centigrades.	Élévation dans un tube dont le diamètre = 1 mm, 2844.	Élévation dans un tube dont le diamètre = 1 mm, 5004.	Élévation dans un tube dont le diamètre = 1 mm, 5066.
Eau.	1	15-16	15,5861	id.	•
Alcool.	0,8198	15	9,1125	id.	•
Id.	0,8196	10	9,301	id.	•
Id.	0,815	8	9,997	id.	•
Id.	0,8153	16	7,078	id.	0,5855
Essence de térébenth.	0,8695	15	9,8518	id.	•

Les diverses densités sont prises aux températures indiquées dans la troisième colonne, et elles sont exprimées en prenant pour unité la densité de l'eau à la même température.

Le rapport inverse des diamètres des deux premiers tubes, est 1,474, et le rapport des hauteurs correspondantes, est de 1,436 pour l'eau, et 1,434 pour l'alcool. Ainsi, l'on peut bien admettre comme loi expérimentale que les hauteurs des colonnes soulevées sont en raison inverse des diamètres des tubes. En calculant d'après ces données, les hauteurs des colonnes d'eau, d'alcool et d'essence de térébenthine qui devraient s'élever dans un tube de 1 millimètre, on trouve les nombres suivants.

Noms des substances.	Densité.	Températ.	Élévation dans un tube dont le diam. = 1 ^m .
Eau.	1	8° 1/5	29 ^m 179
Alcool.	0,8198	8°	12,18
Id.	0,8135	16°	5,15
Id.	0,8525	16°	17,01
Id.	0,9415	8°	12,91
Essence de térébenthine.	0,8655	8°	12,72

Cependant nous devons regretter que les autres résultats de M. Gay-Lussac ne soient pas publiés, et avec d'autant plus de raison qu'il est impossible maintenant d'employer avec confiance les nombres que les autres observateurs nous ont laissés. Il résulte, par exemple, des expériences de MM. Haüy et Trémery que, dans un tube de 1 millimètre de diamètre, l'eau doit s'élever seulement de 13^m 67. Newton avait trouvé à peu près le même résultat, tandis que d'autres physiiciens se rapprochent plus ou moins du nombre 29,79 trouvé par M. Gay-Lussac.

On pourrait peut-être supposer que ces discordances tiennent à quelque différence fondamentale, soit dans l'épaisseur des tubes, soit dans la nature de leur substance. Mais Boyle Hauksbee et plusieurs autres encore ont démontré, par des expériences directes, qu'à diamètre égal les tubes dont les parois sont les plus minces et les plus fragiles, déterminent exactement les mêmes ascensions et les mêmes dépressions que les tubes très épais. Il y a plus, toutes les théories de la capillarité s'accordent à supposer que la nature de la substance n'a aucune part dans les phénomènes, pourvu que le liquide puisse mouiller les parois, et qu'ainsi des tubes de fer et des brins d'herbe bien humectés, produiraient les mêmes effets que des tubes de verre de même diamètre.

Nous avons noté avec soin les températures et les densités, parce qu'il paraît que pour un même liquide les différences de niveau sont en raison directe des densités.

Nous donnerons dans la météorologie les tables de la dépression du mercure dans les tubes de différents diamètres.

448. *Hauteurs différentes auxquelles peut s'arrêter le même liquide dans le même tube.* — Lorsqu'un tube a servi à une expérience, si on le retire du liquide avec précaution, et qu'on observe la hauteur de la colonne qui reste suspendue dans son intérieur, on reconnaît qu'elle est toujours plus grande qu'elle n'était d'abord : par exemple, a s' (Fig. 427) étant la colonne soulevée au-dessus du niveau pendant que le tube est plongé, la colonne suspendue lorsqu'il sera hors du liquide, pourra être a' s' (Fig. 426), ou même a'' s' (Fig. 425). Cette différence dépend de la goutte qui reste à l'extrémité

inférieure du tube, et qui forme un ménisque plus ou moins convexe. En effet, pour des parois très épaisses, sur lesquelles la goutte s'élargit beaucoup, cet excès d'élévation est toujours moindre ; au contraire dans les tubes à parois très minces le ménisque convexe de la goutte étant à peu près égal au ménisque concave du sommet de la colonne, on observe un excès d'élévation presque égal à l'élévation elle-même, c'est-à-dire que a'' s' (Fig. 426) est double de a s' (Fig. 427). On peut, avec quelques précautions, obtenir le même résultat avec des tubes à fortes parois ; il suffit pour cela de dessécher leur extrémité inférieure pour circonscire la goutte et l'empêcher de s'étaler sur toute la largeur.

Les tubes recourbés en syphon présentent des phénomènes analogues, et même ils ont l'avantage d'être plus commodes pour ces expériences. Dans le syphon s s' (Fig. 428), dont le diamètre est uniforme, les sommets s et s' des deux colonnes sont à la même hauteur, tant que le liquide n'atteint pas l'extrémité de la courte branche ; mais dès qu'il y touche on peut faire couler du liquide dans la longue branche et y produire ainsi un excès de hauteur toujours croissant. A mesure que le niveau s y élève, le ménisque de la courte branche perd peu à peu sa forme, sa convexité diminue, et tend à se changer en surface plane, et si l'on observe le phénomène avec attention, il est facile de reconnaître qu'à l'instant où il atteint cette limite, la différence de niveau a à est précisément la hauteur à laquelle s'élève le liquide dans un tube droit de même diamètre que le syphon ; cependant on peut continuer de verser du liquide dans la longue branche ; alors la surface plane qui limite la colonne à l'extrémité de la courte branche devient de plus en plus convexe, et le niveau peut ainsi monter jusqu'à une hauteur a' à double de a ; à cet instant le ménisque forme une demi-sphère, et si l'on verse encore du liquide dans l'autre branche sa convexité crève, et la colonne retombe plus ou moins suivant l'étendue sur laquelle peut s'étaler la goutte qui en résulte.

Ces phénomènes peuvent être produits en sens inverse, en mettant d'abord dans la longue branche du syphon toute la colonne qui peut être soutenue, et faisant sortir du liquide peu à peu par le sommet de la courte branche.

443. Lorsque l'espace capillaire n'est pas cylindrique comme nous l'avons supposé, il se produit des phénomènes un peu plus complexes qui peuvent souvent être ramenés à des lois assez simples.

Tubes concentriques. — Concevons un tube qui ait, par exemple, 10 millimètres de diamètre intérieur, dans lequel on dispose un cylindre de verre de 9 millimètres de diamètre, de manière que leur axe soit commun et qu'il reste autour du cylindre un espace annulaire de 1/2 millimètre d'épaisseur. Les phénomènes capillaires se développeront dans cet espace, et l'on trouve, par expérience, que

la différence de niveau est la même qu'elle serait dans un tube de $1/2$ millimètre de rayon. Ce résultat étant général, on peut l'énoncer ainsi : dans un espace annulaire d'une épaisseur quelconque, l'ascension ou la dépression est la même que dans un tube dont le diamètre serait double de cette épaisseur.

Quand le cylindre intérieur est lui-même un tube, les phénomènes se produisent séparément dans ce tube et dans l'espace annulaire, comme si chacun d'eux était seul. Ainsi le diamètre du tube étant précisément double de l'épaisseur annulaire, les sommets des deux colonnes sont au même niveau ; si le tube est plus fin, le sommet de sa colonne est plus haut, s'il s'agit d'une ascension, et plus bas, s'il s'agit d'une dépression ; c'est le contraire quand le tube est plus large. Dans ce dernier cas, si l'on verse du liquide jusqu'à ce que le ménisque annulaire devienne convexe (Fig. 430), la dépression se change évidemment en ascension. Ce phénomène avait singulièrement étonné un observateur habile, le médecin Petit. (*Acad. des sciences*, 1723.)

Lames parallèles. — L'espace compris entre deux lames parallèles (Fig. 435), n'est en quelque sorte que la limite de l'espace annulaire dont nous venons de parler, car si le tube et le cylindre avaient un grand rayon, ils pourraient être regardés comme parallèles dans une portion considérable de leur contour. Ainsi les hauteurs des colonnes soulevées ou déprimées, doivent suivre la même loi. C'est en effet ce que l'expérience démontre : quelle que soit la distance des deux lames, elles produisent le même effet qu'un tube cylindrique dont le diamètre est double de cette distance. Pour rendre les lames parallèles, on place entre elles plusieurs brins de fil de métal, coupés bout à bout dans le même fil ; leur distance est donnée par le diamètre du fil ; et, en faisant abstraction de la courbure que prend la colonne vers les bords verticaux des lames, on voit que son sommet doit être un ménisque, ayant la forme d'une rigolo ou d'un demi-cylindre creux dont le diamètre est la distance des lames elles-mêmes.

Lames inclinées. La figure 437 représente deux lames inclinées qui se coupent suivant une ligne verticale ; elles sont unies par deux charnières *c* et *c'*, et peuvent être écartées plus ou moins. Lorsqu'on les plonge dans l'eau, le liquide doit monter à des hauteurs inégales en *a* et en *b*, puisque les distances correspondantes des lames sont elles-mêmes inégales, et puisque les hauteurs sont, entre les lames, comme dans les tubes, en raison inverse des distances. Il est facile de démontrer par un calcul très simple que le sommet de la colonne forme une hyperbole équilatère dont les asymptotes sont, d'une part, la commune intersection des lames, et de l'autre le niveau du liquide dans lequel elles plongent.

La figure 440 représente deux lames qui sont de

même inclinées l'une à l'autre ; mais elles se coupent suivant une ligne horizontale, et le plan géométrique qui diviserait leur angle en deux parties égales, peut être lui-même horizontal ou plus ou moins obliques à l'horizon. Lorsqu'on place entre ces lames une goutte d'eau qui les touche l'une et l'autre, on voit qu'à l'instant cette goutte s'arrondit en cercle, et se précipite vers le sommet de l'angle ; sa vitesse augmente ou diminue suivant que l'angle est plus grand ou plus petit, et dans tous les cas, en laissant la lame supérieure horizontale ; et en inclinant convenablement la lame inférieure, on peut combattre la force attractive qui sollicite la goutte à monter vers le sommet, par la force de sa pesanteur qui la sollicite à glisser le long du plan incliné sur lequel elle repose. C'est un moyen, peu précis à la vérité, mais enfin c'est un moyen qu'on a employé autrefois pour mesurer l'énergie de la force capillaire.

Tubes coniques. — Les phénomènes dont nous venons de parler, se reproduisent dans les tubes coniques, avec les mêmes circonstances et par les mêmes causes. La petite colonne *mm'* (Fig. 443 et 444) se précipite vers le sommet du cône ou vers sa base, suivant qu'elle est terminée par deux ménisques concaves ou par deux ménisques convexes, et dans les deux cas on peut la retenir dans une position fixe en inclinant convenablement l'axe du cône dans un sens ou dans l'autre.

On voit pareillement que dans les tubes coniques verticaux, soit que le liquide doive y être soulevé ou déprimé, la hauteur de la colonne ne dépend que du diamètre du tube dans le point où elle s'arrête : au-dessus ou au-dessous de ce point les dimensions n'ont plus d'influence. Pour rendre ce résultat sensible, concevons un entonnoir ou une large cloche (Fig. 429) ayant, par exemple, 50 millimètres de hauteur verticale entre sa base et son sommet, et supposons qu'elle se termine par un petit tube de $1/2$ millimètre de diamètre : il est évident que si on le pose sur l'eau, le liquide n'y montera pas de lui-même ; mais si on l'enfonce jusqu'à un tube capillaire pour la soulever ensuite presque à fleur d'eau, toute la masse liquide y restera suspendue, et il y aura encore une colonne d'environ 10 millimètres dans le petit tube, parce qu'à un demi-millimètre de diamètre correspond une colonne de près de 60 millimètres de hauteur (441), et que tout ce qui est hors de cette colonne se soutient de soi-même par les pressions opposées.

Tubes prismatiques. — Il y a un tel attrait de curiosité à l'étude des phénomènes capillaires que les physiciens en ont poursuivi toutes les modifications par une foule de recherches ingénieuses. Après avoir épuisé toutes les combinaisons que l'on peut faire avec des lames des cônes et des cylindres, un observateur habile, Gellert, imagina de faire construire des tubes prismatiques pour examiner la forme des ménisques et mesurer les

hauteurs correspondantes des colonnes liquides qu'ils pouvaient soulever. (*Comm. de Pétersbourg*, t. 12.) Au moyen de ces tubes dont les sections étaient des triangles et des rectangles, il établit deux lois générales assez simples, savoir : 1^{re} que les hauteurs sont réciproques aux lignes homologues des bases, quand ces bases sont semblables, et 2^{de} que les hauteurs sont les mêmes quand les bases ont des surfaces *équivalentes*. Il paraît cependant que cette seconde loi est soumise à quelques exceptions, on plutôt qu'elle conduit à quelques inexactitudes.

Surfaces de différentes formes. — Ce qui précède nous montre assez clairement que les solides et les liquides ne peuvent pas se toucher sans que la surface mobile du liquide n'éprouve, près du contact, une déformation plus ou moins marquée.

Les inflexions de la courbure dépendent de la forme des corps. Il y a toujours ascension d'un liquide quand il mouille la surface, et dépression quand il ne la mouille pas. Les figures 452, 453, 454 et 455 représentent l'effet des lames, la figure 436 celui des cylindres verticaux, les figures 456, 457, 458, 459, 460 et 461 celui des halles flottantes, les figures 441 et 442 celui des parois des vases, la figure 439 celui des cylindres horizontaux, et la figure 446 celui qui produit les insectes légers qui marchent, ou plutôt qui glissent sur la surface des eaux; car les extrémités par lesquelles ces insectes touchent les liquides exercent aussi une action capillaire, et si elles pouvaient être mouillées elles seraient bientôt submergées; mais un enduit particulier sur lequel l'eau n'a aucune prise, les préserve du danger.

444. *Attraction et répulsion qui résultent de la capillarité.* — Une seule lame suspendue verticalement dans un liquide n'éprouve aucun mouvement de translation, soit que le liquide la mouille, soit qu'il ne la mouille pas; le résultat de cette expérience s'explique en observant que dans chaque cas, les forces sont égales de part et d'autre. Deux lames verticales et parallèles mises en présence, n'éprouvent non plus aucune action, ni aucun mouvement, tant qu'elles sont assez éloignées l'une de l'autre pour que les courbures des liquides soulevés ou déprimés (*Fig. 453 et 454*) soient séparées par un espace rectiligne *o o'*; mais dès qu'on les approche assez pour que cet espace rectiligne disparaisse et que les courbures se croisent, il s'exerce entre les lames une attraction sensible, à l'instant elles se précipitent pour se joindre et se presser l'une contre l'autre. Cette action, qui est également attractive quand les deux lames sont mouillées, et quand elles ne le sont pas, devient au contraire une action répulsive quand l'une d'elles peut être mouillée sans que l'autre le soit. C'est ce que M. Haüy a démontré par l'expérience (*mécaniq. céleste. Supplément à la théorie de l'action capillaire*, page 47) en approchant graduellement une lame

d'ivoire d'une lame de talc; cette dernière substance n'est pas susceptible d'être mouillée par l'eau, tandis que l'ivoire se mouille aisément, et le liquide étant alors déprimé d'un côté et relevé de l'autre, prend une courbure infléchie comme on le voit dans la figure 455. Mais il paraît que si l'on force cette première répulsion, et si l'on contraint les lames à se rapprocher à une distance de plus en plus petite, elles commencent bientôt à s'attirer, et se précipitent aussi comme si la colonne liquide qui les sépare, était terminée à son sommet par un menisque simplement concave ou simplement convexe.

De petits corps ronds flottants sur les liquides présentent des phénomènes d'attraction et de répulsion tout-à-fait analogues et dépendans de la même cause.

Par exemple, deux halles de liège ou de bois flottantes sur l'eau, ou deux halles d'étain flottantes sur le mercure, exercent l'une sur l'autre une attraction dès qu'elles sont à une distance capillaire, c'est-à-dire à une distance assez petite pour que les courbures du liquide se croisent; ainsi à la distance *a* elles sont sans action, et à la distance *a'* s'elles s'attirent. (*Fig. 456 et 459.*)

Deux halles qui ne se mouillent pas, comme des balles de cire ou de liège enfoncées, flottantes sur l'eau, ou des balles de fer sur le mercure, exercent aussi une attraction dans les mêmes circonstances. (*Fig. 457 et 460.*)

Enfin deux halles dont l'une se mouille tandis que l'autre ne se mouille pas, se repoussent toujours lorsqu'elles arrivent à la distance capillaire (*Fig. 458 et 461*); mais pour compléter l'analogie avec les lames, il faudrait qu'à une certaine distance plus petite, cette répulsion se changeât en attraction; c'est, je crois, ce qu'on a négligé de vérifier par l'expérience.

Les cylindres flottans peuvent, pour ces phénomènes être assimilés aux halles flottantes; seulement à cause de leur forme, ils présentent quelques particularités faciles à observer.

Dès qu'ils sont à la distance capillaire, ils s'attirent et se rangent parallèlement; s'ils ont la même longueur, leurs extrémités se mettent au même niveau, et si on les écarte de cette position en les poussant longitudinalement, ils y reviennent par une série d'oscillations. C'est ce que l'on peut vérifier aisément avec des aiguilles ordinaires, légèrement enduites de graisse et posées avec précaution sur la surface de l'eau. (*Fig. 439.*)

En général, tous les corps flottans éprouvent par la même cause des mouvemens plus ou moins rapides lorsqu'ils s'approchent les uns des autres, ou lorsqu'ils approchent des parois contre lesquelles les surfaces liquides se courbent toujours, soit par ascension, soit par dépression. Par exemple, dans un vase d'eau qui n'est pas plein (*Fig. 441*), tous les petits corps mouillés se précipitent vers le bord, et ceux qui ne le sont pas s'en éloignent,

tandis que dans un verre trop plein (Fig 442) c'est le contraire qui arrive.

On avait pensé d'abord que ces mouvemens résultaient d'une action directe de la matière ; mais il est bien évident qu'ils dépendent des courbures des surfaces, puisque les mêmes corps qui se faient ou qui s'attirent sur l'eau n'exercent aucune action à distance égale dans le vide, ou même dans l'air, ou dans d'autres milieux qui les enveloppent de toutes parts.

445. *Adhésion des liquides contre les surfaces solides.* — Lorsqu'un disque solide est posé sur la surface d'un liquide, on ne peut plus le soulever horizontalement comme s'il était libre dans l'air, mais il faut faire un effort un peu plus considérable. Pour mesurer cet effort, on se sert d'une balance ; d'un côté on met le disque horizontal, de l'autre on met des contrepoids, et quand l'équilibre est établi, on approche une surface liquide jusqu'à l'instant où elle touche la surface inférieure du disque ; alors on ajoute peu à peu et sans secousse des poids du côté opposé, et l'on note combien il a fallu en ajouter pour rompre l'adhésion. Ce procédé a été imaginé par Taylor, et les résultats qu'en ont obtenus Cigna, Guyton et beaucoup d'autres physiciens, ont donné naissance à de longues discussions. Nous nous contenterons de rapporter ici les résultats de M. Gay-Lussac.

Pour détacher un disque de verre de 118^{mm}, 366 de diamètre, il a fallu différents poids suivant la nature des liquides, comme on le voit dans le tableau suivant.

Noms des substances.	Densité.	Températ.	Poids nécessaire pour détacher un disque dont le diam. est 118 ^{mm} 366.
			grammes.
Eau.	1,000	8,5	59,40
Alcool.	0,8196	8	51,08
Id.	0,8595	10	52,87
Id.	0,9415	8	57,15
Essence de térébenthine.	0,8695	8	54,10

Un disque de même diamètre, de cuivre en de quelque autre substance qui puisse être mouillée par les liquides, donne exactement le même résultat. Ainsi l'adhésion est, comme la capillarité, indépendante de la nature des solides et dépendante seulement de la nature des fluides. Il est facile d'en concevoir la raison, car, en se soulevant, le disque emporte toujours une couche de liquide. L'effort des poids additionnels n'est donc pas appliqué à séparer les molécules du disque des molécules du liquide, mais bien à rompre la cohésion qui unit les molécules liquides entre elles. Les expériences dont il s'agit donnent donc une mesure de la cohésion du liquide ou de l'attraction qu'il exerce sur lui-même, et l'on voit que cette attraction, tou-

jours très sensible, est variable dans les divers liquides.

Lorsque la surface du disque est de telle nature qu'elle n'est pas mouillée par le liquide, comme il arrive, par exemple, pour le mercure et le verre, alors le poids qu'en ajoute pour les séparer n'exprime plus la cohésion du liquide, mais aussi il est très variable, et M. Gay-Lussac a observé que pour séparer du mercure un disque de verre de 118^{mm}, 366 de diamètre, on devait employer tantôt 296 grammes, tantôt 153, suivant qu'en mettait un temps plus ou moins long à ajouter les poids. Cependant ces expériences font voir d'une manière frappante que, même dans le cas où un solide n'est pas mouillé par un liquide, il s'exerce encore entre les molécules du solide et celles du liquide une attraction plus ou moins forte. Cette conséquence paraît être sans exception ; seulement la cohésion du liquide est alors toujours plus grande que l'attraction que le solide exerce sur lui.

446. *Divers effets de la capillarité.* — Huyghens observa en 1672 (*Journal des savans*, pag. 111) un fait qui parut alors fort étonnant. Un tube de 70 pouces de longueur et de quelques lignes de diamètre, ayant été bien nettoyé à l'alcool, puis rempli de mercure, purgé d'air et retourné avec précaution, toute la colonne resta suspendue dans le tube ; il fallut plusieurs secousses légères pour qu'elle se détachât du sommet et prit sa hauteur ordinaire de 28 pouces dans l'intérieur du tube. C'est évidemment un phénomène d'adhésion ; il se reproduit toutes les fois que la surface intérieure du tube est bien nette et l'appareil bien purgé d'air.

Den Casheis fit, vers 1780, une remarque importante pour la construction des baromètres. Ayant fait bouillir le mercure pendant très long-temps dans un tube barométrique, il s'aperçut, après l'avoir retourné, que le sommet de la colonne formait un menisque à peu près plan, et même plutôt concave que convexe. On voit par ce qui précède que cette forme de menisque doit avoir une grande influence sur la hauteur des baromètres, qui n'ont pas comme celui de M. Gay-Lussac l'avantage d'être corrigés d'avance de tous les effets de la capillarité. La cause de ce singulier phénomène a été long-temps inconnue, et l'en doit à M. Dulong une observation récente qui l'explique complètement. M. Dulong a reconnu, par des expériences directes, qu'en prolongeant l'ébullition du mercure à l'air, il se forme un oxide qui se dissout dans le liquide, et cette espèce de dissolution, assez peu différente du mercure par sa densité, en est très sensiblement différente par ses propriétés capillaires, puisqu'elle acquiert à la fin la propriété de mouiller le verre. Ainsi, pour faire de bons baromètres à cuvette, il faut, autant qu'il est possible, éviter le contact de l'air pendant l'ébullition du mercure.

On doit au P. Abat l'expérience suivante : A B C, (Fig. 446), est un tube recourbé contenant du mer-

cure; le liquide s'y trouve d'abord au même niveau $a c$ dans les deux branches; mais si, après avoir un peu incliné ce tube de manière que le mercure monte vers c' et descende vers a' , on le ramène ensuite doucement dans sa première position, les sommets des colonnes ne sont plus exactement nivelés; celui qui s'était élevé reste plus haut, et en même temps sa convexité est moindre; l'autre reste plus bas, et sa convexité paraît plus grande. C'est un effet de la forme des ménisques qui montre combien il faut prendre de soins dans les observations barométriques et combien il est nécessaire à chaque fois du vainer par de légères secousses le frottement du mercure contre le verre. Pour que le liquide prenne sa véritable hauteur, il faut, comme nous l'avons déjà dit, que le sommet de la colonne prenne sa véritable forme.

Les divers degrés de courbure que prend une goutte de liquide, suivant ses dimensions et suivant la nature des corps qu'elle touche, sont aussi des conséquences de l'attraction de ses molécules sur elles-mêmes, et de leur attraction sur les molécules du corps. Les très petites gouttes de mercure, d'eau, d'alcool, etc., forment des sphères à peu près parfaites sur les corps qu'elles ne mouillent pas; alors elles roulent comme de petits globules solides. On voit même, en filtrant les liquides, des gouttes assez volumineuses rouler long-temps sur la surface du liquide, parce que la petite couche d'air qui les enveloppe empêche le contact immédiat; mais à mesure que les gouttes prennent du volume, elles s'élargissent de plus en plus, et c'est alors par la courbure des contours que l'on peut juger de l'action que leurs molécules exercent sur les corps qu'elles touchent.

La capillarité ne se manifeste pas seulement au contact des solides et des liquides, on l'observe encore entre les solides eux-mêmes : c'est elle qui retient pressés l'un contre l'autre des plans polis de verre, de marbre, etc., même quand les pressions de l'air sont supprimées. On l'observe pareillement entre les solides et les gaz, car en mettant sous le récipient de la machine pneumatique un vase qu'on vient de remplir d'eau, on aperçoit des bulles nombreuses se former sous le liquide, tapisser toutes les parois, et grossir de plus en plus à mesure que la pression diminue. Des feuilles métalliques, comme l'or battu, présentent ce phénomène d'une manière encore plus sensible, car les bulles d'air qui se forment à leur surface après qu'on les a submergées, deviennent sous le récipient, comme autant de petits ballons qui les font monter ou descendre suivant le degré de pression.

447. *Indications théoriques.* — La théorie des phénomènes capillaires appartenant essentiellement à l'analyse mathématique, nous devons nous borner à faire connaître les principes physiques sur lesquels les géomètres ont établi leurs calculs. Ces

principes se réduisent en dernier résultat, 1^o à admettre dans chaque liquide une *force de cohésion* particulière, c'est-à-dire, une force attractive entre les molécules voisines, et 2^o à admettre entre les solides et les liquides une *force d'adhésion*, c'est-à-dire, une force attractive qui agit entre leurs diverses molécules. Mais ces deux espèces de forces attractives ne pouvant être caractérisées que par leur intensité relative pour une même distance, et par la loi suivant laquelle elles décroissent à mesure que la distance augmente, en coupoit quo, faute de données sur ce point, on est condamné à choisir entre une foule d'hypothèses également probables, ou du moins également possibles, et que l'explication à laquelle on arrive dépend de l'hypothèse qu'on adopte. C'est ainsi qu'on a vu paraître d'abord les théories de Jurin, Clairaut, Segner, et dernièrement celle de M. de Laplace et celle du docteur Young. Jurin attribue l'élévation du l'eau dans les tubes capillaires à l'attraction de la partie annulaire du tube à laquelle le sommet de la colonne est contigu; Segner et le docteur Young considèrent les ménisques qui terminent les colonnes soulevées ou déprimées, comme des surfaces élastiques agissant par leurs tensions; Clairaut, sans entrer dans l'explication détaillée des phénomènes, s'élève en quelque sorte au-dessus de toutes les hypothèses par la fécondité de son analyse, et démontre ce résultat remarquable, savoir : que si la loi d'attraction de la matière du tube sur le fluide ne diffère que par son intensité de la loi de l'attraction du fluide sur lui-même, le fluide s'élèvera au-dessus du niveau, tant que l'intensité de la première des attractions surpassera la moitié de la seconde. Si elle en est exactement la moitié, il est facile de s'assurer que le fluide aura dans le tube une surface horizontale, et qu'il ne s'élèvera pas au-dessus du niveau. Si les deux intensités sont égales, la surface du fluide dans le tube sera concave, de la forme d'une demi-sphère, et il y aura élévation du fluide. Si l'intensité de l'attraction du tube est nulle ou insensible, la surface du fluide dans le tube sera convexe, de la forme d'une demi-sphère, et il y aura dépression du fluide. Entre ces deux limites, la surface du fluide sera celle d'un segment sphérique, et elle sera concave ou convexe, suivant que l'intensité de l'attraction de la matière du tube sur le fluide sera plus grande ou plus petite que la moitié de celle de l'attraction du fluide sur lui-même.

M. de Laplace admet que les forces attractives qui produisent les phénomènes capillaires décroissent avec une telle rapidité, qu'elles sont nulles à des distances sensibles, et quand un liquide s'élève dans un tube, il suppose qu'une couche infiniment mince de ce liquide s'attache d'abord aux parois du tube, et forme un tube intérieur qui agit seul par son attraction pour soulever la colonne et pour la maintenir à une hauteur déterminée qui

dépend de la cohésion du liquide et de sa densité. C'est en partant de ces principes qu'il explique tous les phénomènes précédents, et ses explications reproduisent les faits observés avec une telle exactitude, qu'il n'existe peut-être en physique aucune théorie qui soit aussi complètement justifiée par l'expérience. (*Mécanique céleste*, supplément au 1^r livre.)

Cependant il y a plusieurs phénomènes remarquables qui dépendent probablement de la capillarité, et qui ne peuvent jusqu'à présent être rattachés à aucune théorie; nous devons les indiquer ici comme des données premières qui exigent de nouvelles recherches. Ces phénomènes conduiront sans doute les physiciens à quelques découvertes, et les géomètres à de nouvelles formules pour les représenter; car il faut, avant tout, que les effets soient mesurés avec précision, pour que l'analyse puisse remonter aux causes et en développer les lois.

448. *Absorption et filtration.* — L'action absorbante que les corps poreux exercent sur les liquides qui les peuvent mouiller est évidemment une action capillaire; tous leurs petits interstices sont analogues à des tubes plus ou moins fins; leurs parois se revêtent d'abord d'une couche liquide, et cette couche agit ensuite pour attirer le liquide voisin en vertu de sa densité, et pour le retenir en vertu de sa cohésion. La rapidité de l'absorption dépend en général de la forme et de la grandeur des pores du corps absorbant, de l'attraction que par sa nature il exerce sur l'air dont il est imprégné, de celle qu'il exerce sur le liquide, et enfin de celle que le liquide exerce sur lui-même. Tous les corps étant poreux, il semble que tous doivent être absorbans; mais nous avons vu qu'il fallait distinguer les pores dépendans de la nature des substances et les pores dépendans de la structure ou de l'arrangement des parties: les premiers, n'étant que les intervalles nécessaires qui séparent les molécules des corps, ne sont pas aptes en général à recevoir des molécules étrangères, tandis que les pores accidentels sont presque toujours, par leurs dimensions, capables de recevoir les liquides qui mouillent leurs parois. Aussi les masses régulièrement cristallisées ne possèdent que très rarement quelque faculté absorbante, et au contraire les masses irrégulièrement agrégées, ou celles qui résultent d'un amas de poussière ou de fragmens très petits, sont toujours des masses absorbantes. Il n'y a pas, dans la nature inorganique, une seule exception à cette loi, et il ne peut y en avoir dans la nature organique, puisque ici toutes les parties solides sont des tissus, des lacs de fibres, ou en général des assemblages destinés à recevoir un aliment, et par conséquent à recevoir les fluides qui les portent.

La filtration de l'eau au travers des pierres à filtrer, ou au travers du sable et du charbon, celle des liqueurs spiritueuses au travers des papiers

sans colle, et celle de plusieurs liquides au travers des tissus de laine ou de coton, sont autant d'exemples de l'absorption que certains corps exercent sur certains liquides. Car un filtre n'agit pas comme un crible, pour arrêter seulement les parcelles qui sont trop grosses, mais il se meuble par la capillarité, il transmet le liquide indépendamment de la pression, et toutes les gouttes qui passent ont été, dans leur trajet sinueux, constamment soumises à une attraction plus ou moins forte.

Lorsqu'un liquide tient en dissolution quelque corps solide, liquide ou gazeux, il n'arrive presque jamais que les substances absorbantes auxquelles on peut le soumettre exercent une action égale sur les divers élémens qui le composent, et l'on peut se proposer d'examiner si, dans certains cas au moins, l'action capillaire n'est pas capable de rompre l'affinité chimique, et de séparer le dissolvant du corps dissout. Cette question me semble assez curieuse, et en appelant sur elle l'attention des physiciens, je crois pouvoir indiquer d'après quelques essais que les gaz peuvent souvent être dégagés par l'absorption, du liquide qui les contient, et que souvent aussi des dissolutions changent de densité en traversant des filtres très épais, et doués d'une grande action capillaire.

449. *Absorption dans les végétaux.* — La sève se répand dans toutes les parties des plantes, depuis l'extrémité des racines jusqu'à la pointe des branches ou des feuilles les plus élevées: cette diffusion du liquide nourricier par des interstices plus ou moins déliés, et souvent même par des tubes d'un diamètre sensible, est un phénomène qui offre nécessairement quelques analogies avec les phénomènes capillaires. C'est pourquoi nous rapporterons ici les résultats des expériences les plus remarquables qui ont été faites sur ce sujet; nous les emprunterons surtout à la Statique des végétaux de Hales, ouvrage qui reste encore, après un siècle de date, non-seulement comme un modèle de sagacité et de précision, mais encore comme un des recueils les plus complets sur ce point important de la physiologie végétale.

Pour trouver la quantité d'eau absorbée et dévorée par diverses plantes, Hales se servait de l'appareil suivant (Fig. 451).

pp', pot en terre sans ouverture au fond.

ll', lame de plomb, en deux parties, scellées avec un mastie de cire et de térébenthine, sur le contour du pot, et au diamètre de jonction.

a, ouverture pour laisser passer la tige.

t, tube pour arroser et laisser sortir ou entrer l'air.

La plante étant arrosée et pesée le matin et le soir, on peut voir aisément ce qu'elle absorbe et ce qu'elle perd en un jour. La perte se fait sur toute sa superficie, et il suffit d'un calcul très simple pour trouver l'épaisseur de la couche d'eau qui s'évapore sur l'unité de surface et même pour conclure la vi-

tesse avec laquelle le liquide s'élève par la tige. Voici le tableau des principaux résultats :

Noms des plantes.	Quantité d'eau absorbée en 12 h. du jour étalée en pouces cubes.	Section de la tige en pouces carrés.	Vitesse du liquide dans la tige, ou nombre de pouces qu'il parcourt en 1 h.
Grand-soleil.	36	1	3
Chou. . . .	32	2/3	4
Vigne. . . .	9	1/4	5
Pommier. . .	15	1/4	5
Citronnier. .	10	1	5/6

La quatrième colonne indique la vitesse avec laquelle le liquide s'élève dans la tige en supposant qu'elle soit tout-à-fait creuse comme un tube; ainsi, la vitesse réelle est beaucoup plus grande; dans le cas de la vigne, par exemple, dont la section était de 1/4 de ponce carré, Hales avait trouvé par quelques essais que la partie solide occupait les 3/4 de cet espace; les issues par lesquelles s'élevait le liquide étaient donc 1/16 de ponce seulement, et la vitesse réelle était par conséquent de 12 pouces par heure, ou d'un ponce par 5 minutes.

Je n'ai rapporté les nombres précédents que pour donner une idée des phénomènes, car on suppose bien qu'ils dépendent de l'état de l'atmosphère, de l'état de la plante, de l'étendue de ses racines, et surtout de la quantité de ses feuilles et de la surface par laquelle elle transpire.

Cependant MM. Desfontaines, de Mirbel et Chevreul ont répété en 1811, avec le même succès que Hales, l'expérience sur l'absorption du grand-soleil (*Helianthus annuus*), et ils ont obtenu presque le même résultat.

Après avoir constaté l'existence de cette force d'aspiration, Hales essaya d'en déterminer la mesure au moyen de l'appareil suivant, Fig. 448.

ce', cuvette remplie de mercure.

t, tube de quelques lignes de diamètre, terminé par un tube plus large r.

a, rameau pénétrant dans le tube r, masticué avec soin, et recouvert de plusieurs doubles de vessie humide fortement serrés sur le tube et sur le rameau.

Les tubes étant remplis d'eau, on en plonge l'extrémité inférieure dans la cuvette de mercure, et l'on abandonne l'expérience à elle-même; la force d'aspiration est mesurée par la hauteur verticale des colonnes d'eau et de mercure qui sont soulevées et qui restent suspendues dans le tube. Dans les expériences de cette nature il n'est pas rare que des rameaux vigoureux, de 1 ponce de diamètre, revêtus de leurs feuilles, fassent monter le mercure de plusieurs pouces dans le tube; et dans une des expériences de Hales, une tige de pommier de pommes d'or de 3 pieds de longueur, le fit monter

de près de 12 pouces en trois heures de temps, au mois de juillet, par un soleil très chaud.

Une expérience remarquable prouve que cette force d'aspiration n'est pas une force ascensionnelle dans le sens naturel de la tige, car l'absorption se fait avec la même puissance quand la tige est renversée (Fig. 449).

Enfin il paraît résulter d'un grand nombre d'expériences de Hales que la force d'aspiration est sensiblement proportionnelle à la surface d'évaporation, car, en ôtant les feuilles, en ébranchant les tiges, ou en les coupant plus ou moins près du tube d'aspiration, on voit cette force se réduire progressivement.

Des cendres bien scellées dans un long tube vertical exercent aussi une force d'aspiration considérable; d'autres corps pulvérisés produiraient sans doute le même effet, et avec d'autant plus d'énergie qu'ils auraient plus d'affinité pour l'eau, c'est-à-dire qu'ils se mouilleraient plus facilement; mais pour observer dans ces circonstances une aspiration continuelle, il faudrait qu'il y eût dans les parties supérieures une continuelle déperdition, soit par évaporation, soit de quelque autre manière: le bois lui-même n'aspire qu'à cette condition, car une tige droite sans branche absorbe très bien, mais elle ne peut jamais faire monter le liquide au-dessus de son extrémité supérieure, lors même qu'on y adapte un tube pour le recevoir.

C'est d'après Hales et les autres observateurs que nous avons décrit ces phénomènes; nous avons employé leur langage, et comme eux, nous les avons attribués, pour un moment, à une force d'aspiration. Mais, avant d'admettre une force nouvelle pour expliquer un fait, il faut être bien assuré que les forces connues sont incapables de le produire; or, dans tout ce qui précède il n'y a rien qui ne puisse rigoureusement être produit par la double action des pressions atmosphériques et de la capillarité. En effet, reportons-nous à la figure 448 et considérons l'appareil à l'instant où il vient d'être retourné.

1°. A l'extrémité x de la tige s'exerce de bas en haut une pression atmosphérique moins la hauteur de la colonne d'eau contenue dans les deux tubes; cette pression sera, par exemple, de 28 pieds d'eau, à peu près, si les tubes ont ensemble 4 pieds de hauteur verticales.

2°. Il paraît certain que le rameau a, tandis qu'il est vivant et rempli d'humidité, ne peut pas plus laisser entrer l'air par les pores sans nombre qui couvrent ses feuilles et son écorce, que ne le ferait un tube rempli de cendres humides et fortement pressées. Ainsi la pression atmosphérique qu'il supporte sur tous les points de sa surface, ne se transmet pas au liquide qu'il contient pour le faire couler de haut en bas. La pression de bas en haut qui s'exerce en x a donc toute son efficacité pour pousser le liquide dans la tige et pour le ramener jusqu'à la surface des feuilles où il se dissipe par l'é-

vaporation. On peut donc admettre que la pression atmosphérique fait monter le liquide, que la capillarité favorise cette ascension, et qu'elle agit surtout pour le retenir, ou plutôt pour empêcher que l'air n'entre par les pores superficiels et ne le fasse couler de haut en bas.

Il serait important de faire quelques nouvelles séries d'expériences pour mettre à l'épreuve cette opinion.

On ne manquera pas, sans doute, d'élever contre elle plusieurs objections, et parmi les premières qui se présentent, on demandera surtout pourquoi l'absorption perd de sa force à mesure que les plantes perdent de leur vigueur, et comment la pression atmosphérique et la capillarité peuvent pousser la sève jusqu'à la cime des plus grands arbres et la retenir à cette hauteur, qui dépasse souvent une centaine de pieds. Mais sur le premier point on peut remarquer que la cessation de la vie entraîne dans les plantes une désorganisation plus ou moins prompte, et qu'il ne faut pas long-temps pour que les cloisons si fragiles de leurs tissus soient complètement altérées; sur le second point, il ne faut pas perdre de vue que si l'on avait un tube de cent pieds de long et d'un très petit diamètre, plongé verticalement dans l'eau, ouvert en bas, fermé au haut par une membrane perméable à l'humidité, et imperméable à l'air, et qu'on le soulevât peu à peu de 99 pieds au-dessus du niveau, certainement la colonne liquide ne quitterait pas le sommet, puisque le mercure est resté suspendu à 70 pouces dans la tube d'Huyghens, qui avait une assez grande largeur; ensuite, tout semble indiquer que les pertes qui se feraient en haut par l'évaporation seraient immédiatement compensées par une ascension nouvelle; ce serait un fait curieux à vérifier.

Au reste, si les pressions atmosphériques, combinées avec la capillarité, semblent des causes suffisantes pour expliquer la suspension de la sève, elles sont certainement insuffisantes, pour expliquer le phénomène surprenant qui se manifeste dans certaines plantes, et surtout dans la vigne, à l'époque de l'année où la sève monte. Ce phénomène a encore été observé et mesuré par l'illustre auteur de la Statique des végétaux; son appareil est représenté dans la Fig. 450.

Il est un cep de vigne ayant en moins trois ans, coupé net, soit perpendiculairement, soit obliquement, à l'époque des pleurs.

Au clicot a on ajuste un tube de verre *mn'*, contenant du mercure au même niveau *mn'* dans les deux branches; les pleurs continuent, le mercure est refoulé de plus en plus, il hausse dans la branche *m*, et s'élève d'une quantité presque égale dans la branche *n'*. Bales trouva une fois une différence de niveau de 38 pouces, et par conséquent une force d'impulsion capable de faire équilibrer une colonne d'eau de plus de 40 pieds de hauteur; MM. de Mirbel et Chevreul ont obtenu 29

pouces seulement sur un vieux cep en répétant l'expérience de Bales. Il n'y a rien dans les lois connues de la capillarité qui puisse rendre raison d'une telle force ascensionnelle.

Coulomb a constaté directement que dans les peupliers d'Italie la sève monte surtout par les couches qui avoisinent le canal médullaire. Cet ingénieux observateur ayant remarqué un bruissement particulier et des bulles de gas qui se dégageaient à la file sur le tronc d'un peuplier que l'on venait de couper, fit percer d'autres peupliers vivans avec une tarière dans le sens horizontal depuis la surface jusqu'au cœur. Dans toutes les couches extérieures, la mèche de la tarière était à peine humide; mais dès qu'elle arrivait à quelques centimètres de l'axe, la sève s'échouait en abondance, et des bulles gazeuses venaient crever dans l'ouverture en se succédant rapidement.

Les physiologistes ont cherché l'origine de cette force d'impulsion que reçoit la sève à une certaine époque de l'année; mais dans une question aussi délicate les faits valent beaucoup mieux que de longues discussions, et nous nous bornerons à rapporter sur ce point les expériences récentes d'un observateur plein de sagacité, auquel la science doit plusieurs découvertes originales. M. Dutrochet prit une tige de vigne de deux mètres de longueur; il en trouqua l'extrémité, et la sève se mit à couler en abondance. Pendant ce mouvement, qui se continuait avec une grande régularité, la tige fut d'un seul coup rasée près de terre, et, une fois séparée du tronc, la sève qu'elle contenait resta immobile, sans aucun signe apparent d'impulsion; le tronc donnait, au contraire, beaucoup de pleurs, et coupé à son tour à une certaine profondeur en terre, sa sève fut à l'instant arrêtée. La racine ayant elle-même été coupée de proche en proche jusqu'au chevelu, on vit toujours l'impulsion de la sève très forte dans la partie restante, et complètement nulle dans la partie enlevée. Cette expérience paraît concluante, et M. Dutrochet conclut en effet que la force impulsive de la sève a son origine dans les radicules nombreuses dont le chevelu se compose; les radicules sont elles-mêmes terminées par un petit cône blanchâtre qu'on appelle *spongiole*, et quelques observations directes portent M. Dutrochet à penser que cet organe particulier est le véritable siège de la force impulsive. Pour donner plus de poids à cette opinion, il ne s'est peut-être pas inutile de faire l'expérience en sens inverse, c'est-à-dire de couper sur une racine les spongioles ou même les radicules, de la plonger ensuite dans de la sève fraîchement recueillie ou dans de l'eau, et d'observer si les fluides de la tige sont encore animés de quelque force impulsive. Mais soit que cette force réside dans les spongioles seulement, soit qu'elle réside dans une plus grande étendue de ces tubes déliés qui sillonnent les radicules, le chevelu et les racines elles-mêmes, M. Dutrochet suppose

qu'elle est identique avec la force d'*endosmose* et d'*exosmose* qu'il a découverte et dont nous allons essayer de donner une idée.

460. *De l'endosmose.* — Les phénomènes d'*endosmose* découverts par M. Dutrochet sont tout-à-fait nouveaux, et ne manqueront pas sans doute d'attirer toute l'attention des physiiciens et des physiologistes. Pour en mieux faire comprendre le principe, nous décrirons d'abord l'instrument au moyen duquel on peut les rendre sensibles, et que M. Dutrochet appelle *endosmomètre*.

L'*endosmomètre* se compose d'un tube τ , d'un réservoir évasé κ , et d'une cloison ν . Le tube est en verre; il peut avoir plusieurs décimètres de longueur et quelques millimètres de diamètre intérieur; le réservoir peut recevoir diverses formes et être en verre ou en métal; dans le premier cas on le soude au tube, en bien on y adapte celui-ci commençant bouchon à l'émeri sur le col d'un flacon; dans le second cas on peut les sceller ensemble avec un mastic convenable; la cloison est formée de la substance solide, et essentiellement poreuse, dont on veut étudier les propriétés; elle doit fermer l'ouverture du réservoir assez exactement pour que le liquide ne puisse entrer ou sortir qu'en la traversant.

Voici maintenant les phénomènes que l'on observe, quand, par exemple, la cloison est une membrane de vessie fortement scellée sur les bords du réservoir, et quand il y a de l'alcool à l'intérieur et de l'eau à l'extérieur. L'*endosmomètre* étant soutenu verticalement dans l'eau (figure 431) sans que la cloison touche le fond du vase, l'équilibre mécanique s'établit bientôt entre le liquide intérieur, le liquide extérieur et la tension de la cloison. Soit s le niveau de l'eau dans le vase, et n' le niveau de l'alcool dans l'instrument; après un quart d'heure il y aura un changement considérable, le niveau n' se sera élevé de plusieurs millimètres, puis il continuera de s'élever; et si le tube n'a que 4 ou 5 décimètres de hauteur, on peut s'attendre qu'après un jour le liquide aura gagné le sommet et coulera sur les bords. Voilà sans doute un phénomène bien surprenant et bien remarquable. On ne peut l'attribuer, ni à la capillarité ordinaire, car elle serait à peine capable de maintenir l'alcool à quelques centimètres au-dessus du niveau extérieur, ni à une diminution dans la capacité du réservoir par la contraction de la vessie, car il y a au contraire augmentation sensible de capacité par le gonflement qu'elle éprouve. Enfin, l'eau s'est infiltrée au travers de la vessie, car on la retrouve dans l'alcool, et elle s'est infiltrée malgré la pression qui tendait à la refouler en sens contraire, et qui tendait aussi à déprimer l'alcool pour le ramener à peu près au niveau extérieur s . Il y a donc *endosmose de l'eau à l'alcool* au moyen de la membrane de vessie, c'est-à-dire infiltration en sens contraire des pressions hydrostatiques. Si l'on faisait l'expérience dans un

ordre inverse, en mettant l'eau en dedans et l'alcool en dehors, on ne peut guère douter que l'effet inverse ne se manifeste, et que le niveau intérieur de l'eau se baigne au-dessous du niveau libre de l'alcool; il serait bon de le vérifier en y apportant quelques précautions qui ne sont point nécessaires dans l'expérience directe. On pourrait dire alors qu'il y a *exosmose* de l'eau à l'alcool; mais il est plus simple de n'employer qu'une seule expression et de dire toujours qu'il y a *endosmose* pourvu toutefois que l'on ait soin d'indiquer l'ordre des liquides, et de ne pas exprimer simplement qu'il y a *endosmose* entre deux liquides, mais *endosmose de l'un à l'autre*. M. Dutrochet a reconnu :

1° Qu'il y a *endosmose* de l'eau à l'eau gommée, à l'acide acétique, à l'acide nitrique et surtout à l'acide hydrochlorique; mais qu'il n'y a pas *endosmose* d'un liquide à lui-même; non plus que de l'eau pure à l'eau étendue d'acide sulfurique, on réciproquement;

2° Que diverses membranes végétales et animales jouissent à différents degrés des propriétés dont jouit la vessie; que des plaques de terre cuite, d'ardoise calcinée, d'argile et en général de substances alumineuses en jouissent aussi, quoiqu'à un très faible degré (*Ann. de Chim. et de Physiq.*, t. 35 et 37, et l'ouvrage de M. Dutrochet, intitulé : *De l'Agent immédiat du mouvement vital*, etc., ouvrage dont on prendrait sans doute une fausse idée si l'on en jugeait par le titre).

Les forces capillaires telles qu'elles ont été considérées jusqu'à présent sont certainement insuffisantes pour produire ces résultats, car elles peuvent bien élever un liquide au-dessus de son niveau, mais elles ne peuvent jamais le faire sortir du tube ou du canal qui le contient pour l'accumuler et l'étaler sur une grande surface un peu plus élevée que le niveau primitif. Ainsi quand on plonge dans l'eau l'extrémité inférieure d'un tube de verre un peu épais, ayant, par exemple, un centimètre de longueur et un millimètre du diamètre intérieur, le liquide est bien soulevé jusqu'au sommet, puis qu'il monterait jusqu'à trente millimètres de hauteur; mais arrivé là il s'arrête et conserve une courbure dont toute la convexité est au-dessous du plan qui termine le tube (Fig. 438 bis).

La même impossibilité se manifeste aussi dans les canaux capillaires les plus irréguliers (Fig. 438). x est une mèche de coton, une bande de drap ou une réunion de filaments capillaires quelconques qui plonge dans l'eau, par une de ses extrémités x ; le liquide la remplit bientôt, et lorsqu'on la courbe pour abaisser son autre extrémité y , au-dessous du niveau x on voit le liquide qui coule goutte à goutte comme dans un siphon très étroit; mais dès qu'on relève un peu cette extrémité y pour la remettre au niveau x , les gouttes cessent de se former et le liquide ne peut plus sortir.

Pour expliquer les phénomènes d'*endosmose*, il

faut donc recourir à une force différente de la capillarité ordinaire, ou au moins à quelque nouvelle modification de cette force. Voici les deux seules explications qui aient été proposées jusqu'à ce jour :

M. Dutrochet, s'appuyant sur le fait curieux que nous avons rapporté (403), suppose que la cloison de l'endosmètre, mis en contact sur ses deux faces avec deux liquides différents, détermine un courant électrique, dont l'action est capable d'entraîner le liquide dans un sens déterminé, c'est-à-dire du pôle positif au pôle négatif. Il serait difficile de prouver directement que cette explication est bonne, mais il ne serait pas moins difficile de prouver qu'elle est mauvaise; car si l'on démontrait qu'il se dégage en effet de l'électricité pendant l'endosmose, il serait encore permis de douter qu'elle soit la cause du phénomène, et si l'on n'en trouvait aucune trace il ne serait peut-être pas rigoureux de conclure, ni qu'il n'y en a pas, ni qu'elle n'agit pas.

M. Poisson, en tenant compte d'une circonstance que l'on avait négligée jusqu'à présent, essaie de démontrer que les forces capillaires peuvent produire des phénomènes analogues à ceux de l'endosmose (*Ann. de physiq. et de chim.*, t. 35). Concevons deux liquides *a* et *b* séparés par une cloison verticale *c* (Fig. 432). Imaginons qu'ils ne communiquent entre eux que par un tube capillaire horizontal *a b*, et que les hauteurs de leurs niveaux au-dessus de *a b* soient en raison inverse de leurs densités, de telle sorte qu'en ce point leurs pressions hydrostatiques se fassent exactement équilibre. Supposons enfin que l'action attractive de *a* sur *a* soit plus grande que celle de *a* sur lui-même, et que ce dernier liquide remplisse à lui seul la tube *a b*. Cela posé, considérons les actions que ce filet liquide éprouve soit de la part du tube qui l'enveloppe, soit de la part des liquides qui le touchent à chacune de ses extrémités. D'abord si le tube est homogène il ne peut lui imprimer aucun mouvement, car ses actions sont alors égales dans tous les sens et se font équilibre. Ensuite il est évident que si le liquide *a* exerçait sur l'extrémité *n* du filet *a b* la même action que le liquide *s* sur l'extrémité *b*, il y aurait encore équilibre entre ces forces et tout resterait en repos. Mais si l'attraction du liquide *a* sur *b* est, comme nous l'avons supposé, plus grande que celle du liquide *a* sur *a*, il y a un mouvement, et le filet liquide coulera de *a* vers *b*, jusqu'à ce que l'élévation de niveau qui en résulte de ce côté compense par l'augmentation de pression l'excès de la force attractive de *a* sur la force attractive de *a*.

Ainsi, par la considération de l'hétérogénéité des liquides, M. Poisson est conduit à trouver dans l'action capillaire des effets qui semblent tout-à-fait identiques à l'ascension que l'on observe dans l'endosmètre.

Cette démonstration ingénieuse présente cepen-

dant d'assez grandes difficultés : on n'y trouve, par exemple, aucun élément qui dépende du diamètre du tube de communication; il semblerait donc en résulter que des tubes plus ou moins larges détermineraient des phénomènes également intenses, ce qui est contraire à l'expérience. On peut remarquer aussi qu'elle semble s'appliquer à un cylindre solide aussi bien qu'à un filet fluide, d'où l'on pourrait conclure qu'un cylindre solide, plongé horizontalement dans un fluide homogène comme l'eau, prendrait nécessairement un mouvement de translation si ses deux bases n'étaient pas de même matière et n'exerçaient pas des actions égales sur le fluide qui les touche; enfin il faut bien que la réaction soit égale à l'action, et si le filet *n b* est attiré par les molécules du fluide *a*, il attire aussi ces molécules, et il n'y a pas de raison pour que le mouvement se détermine dans un sens plutôt que dans l'autre.

Ces observations tendent seulement à faire mieux sentir combien il est important de multiplier les expériences sur ces nouveaux phénomènes; car il faut des données plus précises et des mesures plus exactes pour en fonder la véritable théorie.

461. *De l'action des poisons sur les plantes.* — On distingue, en général, deux classes de poisons, ceux qui détruisent les tissus avec lesquels ils sont en contact dans l'économie animale, et ceux qui tuent sans produire d'altération sensible dans les organes : on croit que ces derniers frappent directement le système nerveux. Il était intéressant d'étudier sous ce double point de vue l'effet des poisons sur les plantes, et c'est ce que M. F. Marcat a fait avec beaucoup de succès (*Annales de physiq. et de chim.*, t. 29, pag. 300). Les poisons corrosifs qu'il a employés sont l'oxide d'arsenic, le chlorure de mercure, le chlorure d'étain, le sulfate de cuivre, et l'acétate de plomb.

Douze grains d'oxide d'arsenic dissous dans deux onces d'eau ont fait périr, en un ou deux jours, deux ou trois plantes du haricot (*Phaseolus vulgaris*) qui en avaient été arrosés. Le poison avait été ébarbé jusque dans les feuilles et dans les parties supérieures de la tige.

Une branche de rosier périt en quatre jours en absorbant de l'eau arsénisée; elle n'avait pris qu'un cinquième de grain d'arsenic.

Quelques grains d'arsenic déposés sous l'écorce d'un lilas ou dans une fente longitudinale pénétrant jusqu'à la moelle ont suffi pour faire périr non-seulement la tige empoisonnée, mais sa racine et ses rejetons.

Les autres poisons corrosifs offrent des résultats analogues.

L'opium, la noix vomique, l'acide hydrocyanique, la belladone, la ciguë, etc., qui semblent agir directement sur le système nerveux des animaux, sont aussi très actifs sur les plantes, ce qui semble indiquer, comme M. Marcat le conclut de ses nombreuses expériences, qu'il y a dans ces êtres

organisés un système spécial analogue au système nerveux des animaux.

452. *Absorption dans les animaux.* — Les recherches les plus récentes et les plus remarquables qui aient été faites sur ce sujet sont dues à M. Magendie (*Journal de physiologie expérimentale*). Je regrette de ne pouvoir donner ici que la conclusion sommaire de ses nombreuses expériences. La faculté absorbante des vaisseaux dépend de l'état de pléthore dans lequel ils se trouvent ; elle est d'autant moindre que les vaisseaux sont plus remplis et plus distendus ; par exemple, dans l'état ordinaire, un chien est tué en deux minutes environ par l'extrait de noix vomique placé dans la plèvre, tandis qu'il périt en moins d'une minute lorsqu'on introduit le poison après une saignée qui diminue la tension des

vaisseaux ; et, au contraire, il résiste pendant huit ou dix minutes si l'on injecte de l'eau dans les veines avant d'introduire le poison. M. Magendie a même observé qu'en injectant de l'eau autant que l'animal en peut recevoir sans cesser de vivre, il n'y a point encore d'effet produit après une demi-heure. Il est vrai que l'animal est alors avant de recevoir le poison dans un état de grande souffrance, et l'on pourrait dire qu'il ne meurt pas par le poison, parce qu'il est à moitié mort par l'eau dont on a rempli ses veines ; mais l'expérience n'en est pas moins importante, surtout en admettant que la noix vomique enlève à l'instant le reste de vitalité à un animal qui est à moitié mort par une cause autre que la pléthore ; résultat qui a sans doute été vérifié par l'expérience.

CHAPITRE II.

DE LA STRUCTURE DES CORPS.

453. On peut étudier la structure des corps sous deux points de vue :

1^o En considérant seulement leurs formes extérieures pour en déduire quelques lois générales sur leur formation, ou plutôt sur les différents modes suivant lesquels leur volume a dû prendre des accroissements successifs et toujours réguliers ; 2^o en observant les propriétés physiques, souvent très diverses que nous présente une même substance pour en déduire quelques données sur l'arrangement intérieur de ses molécules.

L'étude des formes régulières et variées que prennent les minéraux, constituée elle seule une science importante que l'on appelle *crystallographie* ; mais comme il nous serait impossible, sans nous écarter de notre plan, de donner les premières notions de cette science, nous renverrons le lecteur au *Traité de Haüy*, au *Traité* plus récent et plus complet de M. Beudant ; et aux beaux Mémoires que M. Mitscherlich a publiés sur ce sujet dans les *Annales de Chimie*, depuis 1824.

Ainsi, nous nous bornerons à examiner les propriétés physiques des corps, et les indications qu'elles peuvent nous donner sur l'arrangement moléculaire ; il n'y a sur ce point aucune théorie, ou pour mieux dire, aucun fait complètement expliqué ; nous serons donc réduits à présenter une simple énumération des phénomènes, en nous efforçant de rapprocher ceux qui paraissent dépendre des mêmes causes.

454. Les fluides, en général, soit à l'état gazeux, soit à l'état liquide, nous offrent dans toutes leurs parties une mobilité si grande, qu'elle semble ex-

clure toute idée d'arrangement déterminé. Dans une masse d'eau, par exemple, il ne faut qu'une très petite force pour que la molécule qui est au centre se déplace et vienne à la superficie, ou pour qu'une molécule superficielle s'enfonce au contraire, et sillonne toute la masse, suivant une route plus ou moins sinuée. Un léger mouvement, un changement de température presque insensible, sont toujours des causes suffisantes pour produire ces déplacements et pour bouleverser toutes les positions relatives des molécules. Ce phénomène que nous pouvons observer en petit dans des vases transparents où flottent des poussières visibles, est un phénomène général qui se répète plus en grand dans toutes les masses fluides que nous offre la nature. Ainsi, dans le lac le plus tranquille en apparence, il y a tant de causes sans cesse changeantes qui sollicitent les molécules liquides, que l'on peut bien assurer aussi qu'elles sont à tout moment déplacées ; de même, dans l'atmosphère pendant le calme le plus absolu, on peut être bien assuré que les molécules n'ont point de repos ; et si la masse d'air paraît immobile dans son ensemble, elle n'en est pas moins agitée de mille manières dans toutes ses parties. Cette circulation perpétuelle des fluides semble indiquer une parfaite homogénéité de structure ; cependant dans l'ignorance où nous sommes sur les derniers éléments de la matière, nous ne pouvons rien affirmer sur l'état d'aggrégation des molécules elles-mêmes : il est possible, par exemple, qu'une molécule d'eau, qui est si mobile par rapport aux molécules qui l'environnent, soit un composé de plusieurs molécules élémentaires, assem-

blées par des forces permanentes, et retenues à distance dans des positions parfaitement fixes; car la fixité dans la structure des molécules secondaires n'empêcherait pas leur mobilité relative. Mais pour ne pas se faire une fausse idée de l'état d'aggrégation des liquides et des gaz, il ne faut admettre implicitement, ni qu'ils sont composés de molécules simples ou isolées, roulant on glissant l'une sur l'autre avec la plus grande facilité, ni qu'ils sont composés de molécules secondaires, ou d'atomes plus ou moins nombreux, groupés d'une manière fixe, et se déplaçant tout d'une pièce, sans qu'il y ait de changement dans les positions respectives de leurs éléments; car jusqu'à présent, il n'y a dans la science aucune donnée certaine pour lever nos incertitudes sur ce point.

455. Les corps solides offrent plus de prise à nos observations, parce qu'ils peuvent, pour la plupart, prendre naissance, se former et s'accroître sous nos yeux, et parce qu'ils ont en général des propriétés qui sont en rapport avec leur structure intime. Ces sont ces propriétés que nous allons étudier, en distinguant celles qui peuvent être imprimées aux corps postérieurement à leur formation, et celles qui dépendent essentiellement de leur origine, c'est-à-dire des circonstances dans lesquelles ils ont pris leur solidité.

456. *Des changements de structure que peuvent prendre les corps solides sans perdre leur solidité.*

Changement de forme des cristaux. M. Mitscherlich, en étudiant les propriétés optiques de la chaux sulfatée, a reconnu que dans les lames cristallisées de cette substance, la structure intérieure change avec la température, sans qu'on puisse apercevoir à l'extérieur aucune modification sensible, ni sur les côtés, ni sur les faces polies de ces lames. D'autres substances cristallisées lui ont ensuite présenté le même phénomène.

Le sulfate de Nickel, en cristaux prismatiques, ayant été exposé, en été, à la lumière solaire, dans un vase fermé, les particules ont changé de position dans la masse solide, sans que l'état fluide eût en lieu; et lorsqu'au bout de quelques jours on a brisé les cristaux dont la forme extérieure n'était point changée, on les a trouvés composés d'octaèdres à bases carrées, offrant parfois un volume de quelques lignes (*Ann. de Chimie*, t. 37, pag. 205).

Le séléniate de zinc à forme prismatique, exposé au soleil sur une feuille de papier, se transforme aussi en peu d'instans en cristaux octaédres à base carrée.

Des cristaux de sulfate de magnésie et de sulfate de zinc, chauffés graduellement dans l'alcool jusqu'au point d'ébullition de ce liquide, perdent peu à peu leur transparence; et lorsqu'on les brise, on les trouve composés d'un grand nombre de nouveaux cristaux très petits, qui sont, pour la forme, entièrement différens de ceux qu'on avait employés.

Ces faits remarquables, et bien constatés par un habile observateur, démontrent jusqu'à l'évidence que, même dans les corps solides, les molécules constitutives n'ont pas des positions relatives invariables, mais qu'elles peuvent encore changer de place, s'arranger et passer successivement par des états d'aggrégation complètement différens.

Adhésion des glaces. Quand les glaces ont reçu le dernier poli, on les essie pour les mettre en magasin, en les dressant de champ l'une contre l'autre, à peu près comme des livres un peu inclinés dans le rayon d'une bibliothèque. Dans cette position, elles contractent avec le temps une adhésion plus ou moins forte; il arrive assez souvent qu'on ne peut les séparer sans les rompre, et quelquefois l'adhésion est si intime, que trois ou quatre glaces sont comme incorporées l'une à l'autre, au point qu'on peut les travailler ensemble, les user sur leurs bords, et enfin les couper au diamant comme on couperait une seule plaque de verre. M. Clément Desormes m'a fait voir plusieurs morceaux de deux, trois ou quatre glaces qu'il avait recueillis à la manufacture royale de Saint-Gobin, pour les soumettre à diverses épreuves. Ces échantillons formaient des rectangles ayant plusieurs pouces de côté, et les diverses pièces qui les composaient, ainsi soudées par le temps, à la température ordinaire, n'avaient pas moins d'adhérence que si elles eussent été coulées ensemble; car il fallait une force mécanique très grande pour les faire glisser sur leurs surfaces de jonction, et lorsqu'on croyait enfin les avoir séparées, on était très étonné de voir qu'il n'y avait pas eu glissement, mais rupture dans l'épaisseur des glaces, de telle sorte que la surface de jonction de l'une restait convertie dans une assez grande étendue de larges lambeaux détachés de l'autre.

Changement du zéro dans les thermomètres à mercure. Nous avons rapporté (156) l'observation précieuse de M. Bellani, sur le déplacement qu'éprouve avec le temps le zéro des thermomètres à mercure. Ce déplacement a toujours lieu dans le même sens, comme si la capacité du réservoir devenait de plus en plus petite ou moins pendant les premiers mois qui suivent la construction de l'instrument. Quelques physiciens attribuent ce phénomène à la pression atmosphérique qui s'exerce de dehors en dedans sur le réservoir, et qui n'est pas balancée par une égale pression de dedans en dehors quand le tube est purgé d'air; ils supposent en conséquence que, dans des thermomètres tout ouverts, le zéro resterait parfaitement fixe, et que, dans les thermomètres à alcool, la variation doit être beaucoup moindre à cause de la pression qui résulte de la vapeur alcoolique. Des expériences sur ces deux dernières espèces de thermomètres viendront sans doute confirmer ou détruire l'explication; mais en attendant qu'elles soient faites avec tout le soin qu'elles méritent, on peut présumer avec assez de raison que les réactions moléculaires dont nous ve-

nous de parler entrent pour quelque chose dans la diminution de capacité des réservoirs.

Moiré métallique. Tout le monde connaît les nuances nacrées et chatoyantes que présente le moiré métallique, et les dessins fort singuliers qui résultent des variations de leur éclat. C'est un des phénomènes les plus propres à donner de justes idées sur la structure intérieure des corps. Une feuille de fer-blanc n'offre, dans son état naturel, qu'une surface mate, sans aucune trace d'arrangement moléculaire; on pourrait penser que la couche mince d'étain fondu s'est simplement appliquée sur le fer, et s'y est consolidée d'une manière confuse, comme ferait à peu près une couche de suif ou de cire; mais quand on sait avec quelle facilité se produit le moiré le plus éclatant, on est conduit à une tout autre conclusion. Il n'y a presque pas de dissolution acide qui, versée un peu chaude sur une feuille de fer-blanc, ne fasse paraître à l'instant une foule de nuances plus ou moins nacrées. Chaque ouvrier a sans doute son secret, on plutôt sa méthode particulière pour obtenir ce résultat; mais, en général, on fait paraître un très beau moiré, en dissolvant une partie de sel ordinaire, et une partie d'acide nitrique dans quatre parties d'eau. Quand la feuille a été arrosée par cette dissolution, on la plonge un instant dans de l'eau acidulée, on la lave et elle est moirée. Dans cette opération, les facettes miroitantes ne sont pas produites par l'action chimique qui s'exerce sur le métal, elles sont seulement mises à découvert; toutes les parties métalliques confusément cristallisées qui les cachaient sont enlevées; aussi, pour varier les dessins, suffit-il de chauffer en quelques points la feuille de fer-blanc, et de la refroidir tantôt brusquement, tantôt lentement, avant de la soumettre à l'action chimique. Les divers modes de refroidissement auront déterminé des arrangements cristallins dont la différence deviendra manifeste.

Tous les métaux qui cristallisent facilement peuvent présenter des phénomènes analogues: il suffit, par exemple, de plonger dans un acide convenablement affaibli un calet de bismuth, pour faire paraître sur sa surface des facettes régulières, qui attestent son état cristallin intérieur.

De l'acier damassé. Il paraît, d'après les observations récentes de M^{me} Faraday et Stodart, de M. Bréant et de M. Berthier, que l'acier damassé que l'on appelle aussi *voetz*, *acier de l'Inde*, ou *acier de Bombay*, ne doit son aspect moiré qu'à une cristallisation particulière du métal, ou plutôt de la combinaison qui le constitue.

M^{me} Faraday et Stodart, en soumettant à une haute température long-temps soutenue un fer très carburé et de l'alumine pure, ont obtenu un alliage cassant, de couleur blanche, qui avait la propriété de donner à l'acier ordinaire toute la malléabilité et toutes les qualités physiques du meilleur acier de l'Inde. Il suffisait pour cela de faire

fendre l'acier avec environ un septième ou un huitième de son poids d'alliage, et de le soumettre ensuite à l'action de l'acide sulfurique affaibli pour lui donner l'aspect des damas.

M. Bréant est arrivé au même résultat par un moyen aussi sûr et qui se prête beaucoup mieux à une exploitation en grand. Il fait son acier damassé en combinant avec le fer des proportions de charbon un peu plus fortes que celles qui donnent l'acier ordinaire. L'alliage étant en pleine fusion, on le laisse refroidir *très lentement*, on le travaille, et ensuite on le damasse par l'immersion dans l'eau acidulée.

Enfin, M. Berthier a aussi obtenu des aciers damassés de bonne qualité en alliant l'acier, tantôt avec 10, tantôt avec 15 millièmes de chrome; ces aciers se sont l'un et l'autre très bien travaillés sous le marteau, ont produit d'excellentes lames et se sont moirés à l'instant par le contact de l'acide sulfurique.

Ces résultats font voir d'une manière bien frappante à quel point les propriétés physiques les plus délicates dépendent de l'arrangement des molécules; car une même lame peut prendre des aspects damassés très différents, et celui qu'elle présente lorsqu'elle est travaillée pour recevoir un tranchant très vif, n'est pas le même qu'elle aurait si elle était travaillée pour être plus ou moins dure, plus ou moins malléable, ou plus ou moins élastique. Jusqu'à présent il n'y a que l'œil exercé d'un ouvrier qui puisse démêler ces nuances; mais il suffirait sans doute d'avoir des données plus précises sur les divers états d'aggrégation des corps, pour en déduire avec certitude les propriétés physiques qui en résultent.

De la trempe et du recuit. L'arrangement des molécules ne se maintient pas toujours par des facettes cristallines, comme nous venons de le voir dans les cas précédents; il faut souvent, pour y saisir quelque différence, avoir recours à la cassure et à tous les accidents qu'elle peut présenter; encore, dans beaucoup de cas, ces derniers moyens que nous puissions employer sont infidèles et peu sûrs, soit que nous n'en ayons pas fait une étude assez exacte, soit qu'il y ait dans les molécules des corps des groupements si petits qu'ils nous paraissent identiques dans leur ensemble, lorsqu'ils sont individuellement très différents. Toutes les propriétés qui résultent de la trempe sont dans ce cas: quelques tranchées qu'elles soient, il nous est à peu près impossible de démêler les diverses structures qui correspondent dans un même corps aux divers degrés de trempe; mais comme on ne voit rien en lui qui puisse varier, excepté l'arrangement de ses molécules, on est bien porté à conclure que c'est là la cause qui lui donne les qualités si singulières et si diverses que nous observons et dont nous allons essayer de prendre une idée.

Il n'y a que très peu de corps qui soient susceptibles de recevoir la trempe: l'acier est du nom-

bre, soit qu'il ait été obtenu *naturellement*, ou par *cémentation*, ou par *fusion*. Pour tremper l'acier, il suffit de le porter à une haute température et de le refroidir brusquement. Les divers degrés de trempe dépendent et de l'élévation de la température et de la rapidité du refroidissement.

En partant du *rouge-blanc*, le refroidissement subit dans le mercure, dans le plomb ou dans quelque acide, donne la *trempe la plus dure*; le refroidissement dans l'eau donne une trempe un peu moins dure et le refroidissement dans les corps gras, comme l'huile ou le suif, donne des trempes encore un peu moins dures.

En partant du *rouge rose*, du *rouge vif*, du *rouge cerise*, ou du *rouge brun*, on a des trempes toujours décroissantes, c'est-à-dire toujours moins dures, et d'autant moins que le corps refroidissant est moins actif; ainsi pour chacune de ces températures, l'huile paraît donner une trempe moins dure que l'eau, et l'eau un peu moins dure que le mercure.

L'acier qui a reçu la plus forte trempe est plus cassant que le verre: il arrive assez souvent que les coins qui servent à frapper les monnaies et les médailles, se brisent naturellement sans recevoir de chocs ni de pressions, même dans des lieux où la température varie peu.

Les instrumens qui doivent avoir une trempe très dure ne doivent l'avoir en général que dans une petite partie de leur volume; aussi se garde-t-on de les tremper en entier: les burins, par exemple, ne sont trempés que dans une petite partie de leur longueur, et c'est ainsi qu'ils peuvent être très durs à la pointe, et cependant assez solides et assez résistans dans leur ensemble.

Les ouvriers qui travaillent l'acier savent donner à chaque instrument le degré de trempe qui lui convient suivant l'usage auquel il est destiné; mais on conçoit qu'il serait bien difficile de saisir ce point avec précision si l'en n'avait pour guide que la nuance du rouge à laquelle il faut plonger l'acier dans le mercure ou dans l'eau pour lui faire prendre toutes les qualités qu'en se propose de lui donner, aussi est-il bien rare que l'en suive cette méthode. On a un autre moyen de varier la trempe avec certitude, et pour ainsi dire à volonté: ce moyen est le *recuit*; il repose sur la propriété que possède l'acier trempé dur, de se détremper peu à peu suivant le degré de chaleur auquel on l'expose. On commence donc par donner une trempe très dure, et en la réduit graduellement. La seule difficulté est d'avoir une série de caractères auxquels on puisse reconnaître les divers degrés de chaleur par lesquels on passe. Or, ces caractères se présentent d'eux-mêmes dans l'acier: lorsqu'il a été trempé et qu'on l'expose pour le recuire sur des charbons allumés ou seulement sur du poussier de charbon, sa surface prend des couleurs très marquées qui changent avec la température. Ces couleurs sont les suivantes: jaune paille, rouge pour-

pre, bleu violet, bleu, bleu clair, couleur d'eau. Il paraît qu'en partant d'une trempe dure, il faut, pour avoir la trempe des canifs et des raseurs, arrêter le recuit au jaune paille, l'arrêter au pourpre pour avoir celle des couteaux et des ciseaux, au bleu pour celle des ressorts du montre, et seulement à la température du rouge naissant pour avoir celle des ressorts de voiture. Il est bien rare que des pièces d'acier bien dressées ne se déforment pas par la trempe, et souvent le recuit qu'elles doivent éprouver n'est pas assez grand pour qu'on puisse les redresser au marteau; c'est, par exemple, ce qui arrive aux aiguilles magnétiques, car il est bon de ne pas les recuire jusqu'au bleu. Dans ce cas on chauffe les pièces dans un tube ou dans un manchon de fer, afin qu'elles prennent plus sûrement une température uniforme dans toute leur étendue, et ensuite on les laisse tomber verticalement dans l'eau, d'une hauteur un peu grande, afin que tous les points de la surface soient saisis par le froid presque au même instant.

Le verre peut être trempé comme l'acier, et s'il est impossible de lui donner par le recuit la souplesse et l'élasticité des ressorts, il est possible au moins de diminuer beaucoup sa fragilité. Tout le monde sait comment se font les *larmes bataviques*, et comment elles se réduisent en poussière dès qu'en en brise la pointe. Puisqu'elles se ferment en versant du verre fondu dans l'eau froide, et puisqu'elles éclatent en mille fragmens lorsqu'on rompt en quelques points leur continuité, il est évident qu'elles sont tout-à-fait analogues à l'acier fortement trempé; aussi lorsqu'en fait recuire une lame batavique jusqu'à une température voisine du rouge, elle devient comme du verre ordinaire et ne se brise plus que dans les points qui reçoivent le choc. C'est pour cela que dans les verreries on prend grand soin de recuire les pièces qui sont semées pendant leur fabrication à un refroidissement un peu rapide.

Nous verrons dans la polarisation de la lumière un procédé curieux pour observer l'arrangement moléculaire des corps diaphanes, et nous reconnaitrons par exemple que le verre est presque toujours trempé en plusieurs points de sa masse, à moins qu'il n'ait été refroidi avec beaucoup de précautions.

Il y a une substance qui présente des phénomènes de trempe d'autant plus singuliers, qu'ils sont exactement opposés à ceux que présente l'acier: cette substance est l'alliage des instrumens chinois que nous connaissons sous le nom de *tam-tam*; elle se compose de quatre parties de cuivre pour une partie d'étain. Quand l'alliage des tam-tams est lentement refroidi, il est fragile comme le verre; au contraire, quand il est refroidi rapidement il devient malléable, il peut être travaillé au marteau, façonné en instrumens, et exécuter par son élasticité ces vibrations multipliées qui produisent des sons si graves et si pleins. C'est même d'après cette

observation curieuse que nous pouvons maintenant en France exécuter des tam-tams, moins bons peut-être que ceux des Chinois, mais assez sonores cependant pour entrer dans nos orchestres.

On a coutume d'expliquer les phénomènes de la trempe du verre et de l'acier, en disant que les molécules superficielles saisies par le froid se consolident brusquement en formant une espèce de voûte qui enveloppe de toutes parts le noyau intérieur, tandis qu'il est encore très dilaté par la chaleur : si ce noyau se refroidissait librement, il diminuerait de volume; mais forcé, comme il l'est, d'occuper en se refroidissant le même espace qu'il occupait étant très chaud, ses molécules éprouvent une grande tension et font un effort continuel pour briser la voûte de dehors en dedans, et la brisent en effet avec explosion quand une cause extérieure vient favoriser leur action. Par cette espèce de comparaison l'on explique tout au plus la facilité avec laquelle le verre trempé se brise ou se réduit en poudre, mais l'on n'explique ni la dureté que prend l'acier, ni l'élasticité, ni les autres propriétés remarquables qui correspondent aux divers degrés de trempe, et l'on n'explique pas à plus forte raison ce qui arrive à l'alliage des tam-tams. On a coutume de dire aussi que les autres corps n'ont pas la propriété de se tremper, mais cela signifie seulement qu'ils n'ont pas la propriété de devenir fragiles par le refroidissement, car il est bien probable que tous les corps brusquement refroidis diffèrent des corps recuits par quelques propriétés physiques, comme ils en diffèrent par leur densité ou par la marche de leur dilatation.

De l'écrasement. Lorsqu'un corps métallique peut être martelé à froid sans se rompre et sans se gercer, il devient ordinairement plus ferme, plus élastique, plus sonore, et l'on dit alors qu'il est *écroui*. Le laiton, l'argent, le cuivre, l'étain et même le plomb présentent de grandes différences dans leurs propriétés lorsqu'ils ont été simplement fondus et refroidis ou lorsqu'ils ont reçu un écrasement convenable. Ce qui se produit par le marteau se produit encore à un degré plus ou moins marqué par l'action de la lime, par celle du burin et par les pressions qui s'exercent dans les trous des filières ou entre les cylindres des laminaires. Lorsqu'un métal a été trop fortement écroui par l'une ou l'autre de ces actions mécaniques, il devient cassant au point qu'il est impossible de le courber en même de continuer sur lui le même travail sans le voir se rompre ou se gercer. Alors on le fait recuire comme l'acier qui a reçu une trempe trop dure, et l'on peut sans danger le reporter sous le marteau ou lui donner d'autres traits à la filière. Toutes ces propriétés méritent quelque attention de la part des physiciens, car elles peuvent avoir une influence sur beaucoup de phénomènes, tels que l'élasticité, la dilatation, la conductibilité pour la chaleur ou pour l'électricité, et particulièrement sur les irré-

gularités que présentent quelquefois les instruments de précision; car il suffit, par exemple, qu'un cercle soit inégalement écroui dans les divers points de son contour ou de son épaisseur pour qu'il se tordement et se gauchisse avec le temps.

457. *Des propriétés que prennent les corps en se consolidant après une fusion complète ou incomplète.*

Cristallisation de l'eau. Il y a peu d'observateurs qui n'aient eu la curiosité d'examiner la congélation de l'eau, et de suivre l'accroissement des fines aiguilles de glace qui se forment d'abord à sa superficie ou sur les solides qu'elle touche. D'un instant à l'autre ces aiguilles se développent et se ramifient de mille manières par le progrès de la solidification. Il est rare, à la vérité, qu'elles prennent des formes cristallines régulières comme celles qu'on observe dans le givre ou la neige (voyez la météorologie), mais leur aspect suffit cependant pour montrer comment les corps solides se constituent, et comment, dans un volume donné de glace, on peut concevoir une infinité de surfaces courbes, qui séparent ce qui a été solide dans un moment de ce qui a été solide dans l'instant suivant. C'est au reste ce que nous allons mieux voir encore par d'autres exemples.

Cristallisation du soufre. Un cylindre de soufre paraît à peu près homogène à l'extérieur, mais lorsqu'on le brise en voit autour de son axe une infinité de petites aiguilles transparentes qui se croisent sous tous les angles. Cette cristallisation régulière s'est opérée dans l'intérieur, parce que le refroidissement y a été plus lent qu'à l'extérieur. En effet, la grandeur des cristaux dépend de la masse qui était en fusion et de la rapidité de son refroidissement. En faisant fondre ensemble 50 livres de soufre, M. Mitscherlich a obtenu des cristaux d'un demi-pouce d'épaisseur qui avaient une grande régularité. Le bain était refroidi lentement pendant quatre en cinq heures, et l'on percevait la croûte épaisse qui s'était formée au-dessus pour *décanter* le liquide intérieur. Ces cristaux, une fois formés, ne se seraient pas sans doute décomposés pendant la solidification du liquide restant; ils se seraient seulement enveloppés de nouvelles couches solides plus ou moins régulières; et lorsqu'on aurait brisé la masse après une solidification complète, *sans décoloration*, la cassure, tout en présentant quelques facettes cristallines, n'aurait pu donner une juste idée de l'état d'aggrégation des molécules.

Cristallisation du bismuth. Le bismuth très pur est, parmi tous les métaux, celui qui cristallise avec la plus grande facilité; on le fait fondre dans un creuset, on le verse dans un test un peu chauffé d'avance, et l'on attend que la croûte superficielle ait acquis une solidité convenable; alors on *décante*, c'est-à-dire que l'on prend le test comme pour verser ce qu'il contient; le liquide intérieur coule après avoir percé la croûte

par son poids, et la calotte solide qui reste attachée au test présente des cristaux irréguliers de plusieurs lignes de surface, formant par leur arrangement mille reflets et mille accidens singuliers.

Cette expérience curieuse et la précédente sont bien propres à nous faire pénétrer la structure inférieure des corps; ce n'est qu'en suspendant ainsi leur formation, et en séparant à l'instant donné ce qui est déjà solide de ce qui reste encore liquide, que l'on peut se faire une idée des groupemens moléculaires qui constituent les masses. Et comme les cristaux qu'on obtient par ce procédé dépendent, pour leur grandeur et leur arrangement, de la vitesse avec laquelle la masse se refroidit, on ne peut douter que toute la texture d'un corps solide quelconque ne dépende des circonstances sous lesquelles il s'est consolidé.

Consolidation sous diverses pressions. — La pression sous laquelle se trouve le liquide au moment où il se solidifie exerce aussi, pour l'ordinaire, une influence marquée sur l'état d'aggrégation qui en résulte. Ainsi, lorsqu'on jette dans le moule une cloche de grandes dimensions, les couches inférieures ne prennent pas exactement la même texture que les couches supérieures; il en est de même pour les caucos, et l'on sait qu'il n'est pas indifférent de les jeter dans un moule horizontal en vertical, ni de les forer en plaçant l'axe à la partie supérieure ou inférieure du cylindre de coulée.

De la fonte et de l'acier fondus. Il y a des corps qui semblent changer de nature par des fusions répétées, tels sont le laiton, la fonte et l'acier; mais on peut remarquer en général que ces modifications ne se montrent que dans les corps composés qui peuvent éprouver quelque altération dans les proportions de leurs principes constituans, soit par la haute température à laquelle ils sont soumis, soit par l'action des corps étrangers avec lesquels ils sont en contact. Ainsi, quand la fonte douce devient aigre par une seconde ou par une troisième fusion, il est probable que cet effet singulier ne tient pas seulement à des états d'aggrégations différens, mais bien à des proportions variables de charbon que l'analyse chimique ne peut pas assigner. Il en est sans doute de même pour l'acier fendu, car nous avons remarqué, en parlant du damassé (page 293), que de très petites différences dans les proportions du charbon pouvaient donner des états cristallins très différens à l'œil.

Du fer. Il paraît que le fer du commerce le mieux purifié contient encore des traces de charbon, et comme dans cet état en épreuve déjà de grandes difficultés à le mettre en fusion, l'on peut conclure que du fer absolument pur serait excessivement difficile à fondre, surtout à cause de la nécessité où l'on serait d'éviter le contact de toutes les matières charbonneuses. Ce n'est donc pas par

une fusion complète que l'on obtient le fer dans les arts, mais seulement par une fusion pâteuse qui donne aux molécules assez de liberté pour qu'elles puissent s'arranger et même former divers systèmes cristallins, très perceptibles dans la cassure. Ce métal nous donne donc une nouvelle preuve que, même à l'état solide et sans liquéfaction, les molécules peuvent se déplacer et s'agréger par leur affinité mutuelle, de manière à produire des cristaux plus ou moins volumineux. Car les martinets qui corroient le fer, et les cylindres qui le compriment pour en chasser les scories liquides, peuvent bien lui donner de la ténacité; mais à coup sûr ces forces mécaniques sont peu propres à déterminer les cristallisations régulières qu'on y observe souvent.

Du platine. Le platine en petites masses peut bien être fondu par l'action de la pile (350) ou par celle d'un chalumeau à gaz oxygène, mais il est si réfractaire que nos moyens les plus efficaces ne peuvent en fondre que des parcelles. Cependant on sait à présent l'obtenir en grande masse; on le passe à la filière, on le lamine, on le travaille au marteau pour en faire des fils, des tubes, des creusets, des cornues, des syphons, des chaudières et plusieurs autres instrumens qui sont d'une grande utilité dans la chimie et dans les arts. Toutes ces formes qu'il peut prendre supposent entre ses molécules une affinité puissante et une mobilité assez grande pour qu'elles puissent s'arranger sans que la masse soit liquéfiée. Pour mieux faire comprendre cette vérité il suffit de rappeler en peu de mots la série des manipulations que reçoit le platine pour être tiré du minerai et transformé en une masse solide.

D'abord on fait passer le minerai par une série de dissolutions qui ont pour objet de séparer le platine des nombreux métaux auxquels il est allié, et l'on arrive enfin à une dissolution qui ne contient plus que de l'hydrochlorate de platine et d'ammoniaque.

Ce sel double se précipite par l'évaporation en une poudre dont la couleur est un jaune orangé assez éclatant.

On l'expose à une haute température, et tout se vaporise, excepté le platine qui reste en masse spongieuse, plus friable que de la cendre agglomérée par le feu. C'est avec cette poussière sans consistance qu'il faut faire une masse solide et homogène.

Pour cela on la tasse dans des mortiers de fer, on la comprime pendant qu'elle est soumise à une haute température, et l'on obtient enfin une espèce de pâte que l'on achève de solidifier en la forgeant.

Il n'est sans doute pas nécessaire d'entrer dans de plus longs développemens sur les divers modes d'aggrégation par lesquels peuvent passer les corps solides soumis à l'action du feu; l'art de la verrerie, la fabrication des porcelaines et des poteries,

nous en offrirait encore une foule d'exemples. On pourra sur ce point consulter les observations intéressantes de M. Fleurian de Belle-Vue, et de M. Dartigues sur la cristallification du verre (*Journal de physique*), et celles de M. Mitscherlich sur des micas artificiels trouvés dans les scories des forges de Garpenberg (*Ann. de chimie*, t. 24, p. 69).

458. *Des propriétés que prennent les corps en se précipitant des dissolutions qui les contiennent.* — S'il y a, comme nous venons de le voir, un grand nombre de corps solides que l'on peut obtenir par la fusion, ou en général par l'action du feu, il y en a beaucoup d'autres que l'on ne peut obtenir que par la voie humide, c'est-à-dire par des liquides qui les prennent en dissolution et qui les laissent déposer par l'évaporation. C'est ainsi, par exemple, que le sel ordinaire se produit dans les marais salans par l'évaporation de l'eau de mer, et que le sucre solide se tire du suc de cannes par une évaporation convenablement ménagée. Les corps que l'on obtient par cette voie peuvent prendre des structures encore plus distinctes et plus variées dans leurs apparences que ceux que l'on obtient par le feu. Quand l'évaporation s'accomplit lentement dans un lieu tranquille, sans variations sensibles de température, le corps solide qui se dépose s'arrange en beaux cristaux parfaitement réguliers, transparents pour l'ordinaire, et terminés par de larges faces planes et polies; mais quand l'évaporation est très rapide, le corps solide se précipite en poudre opaque, qui n'offre aucune trace de régularité ni d'aggrégation. Entre ces deux extrêmes il est vrai de dire en général que le corps solide prend en se précipitant toutes les nuances de structure que l'on peut imaginer depuis l'état pulvérulent le plus informe jusqu'à l'état cristallin le plus parfait. Ainsi la pierre à bâtir ordinaire (*carbonate de chaux*) et le beau marbre blanc de Carrare ou de Paros, ne sont qu'une même substance qui a pris à son origine des états d'aggrégations différents; le marbre lui-même n'est encore qu'une *cristallisation confuse*, car elle est sans transparence, et il y a bien des degrés intermédiaires entre sa structure et celle des cristaux limpides du *spath d'Islande*. Pareillement le charbon, la houille, le lignite, l'anthracite et le diamant ne sont qu'une seule et même substance diversement aggrégée. Toutefois il y a cette différence entre ces deux exemples, que nous pouvons artificiellement produire des cristaux de chaux carbonatée, tandis que, jusqu'à présent, l'on n'a fait pour produire le diamant que des essais malheureux.

Les substances qui se déposent en cristallisant dans les dissolutions aqueuses, se combinent ordinairement avec une certaine quantité d'eau qu'elles conservent à l'état sec, et que l'on appelle l'eau de cristallisation.

M. Haidinger avait observé, et M. Mitscherlich a confirmé récemment par un grand nombre de faits, cette vérité importante pour la cristallographie, qu'une même substance, en cristallisant à diverses températures, peut prendre des proportions variables d'eau de cristallisation et en même temps affecter des formes différentes.

Ainsi le sulfate de soude, qui est comme on sait plus soluble à 33° qu'à tout autre degré de chaleur moindre ou plus élevé, cristallise à cette température sans eau de cristallisation, tandis qu'à la température ordinaire il prend de l'eau et une tout autre forme.

Le séléniate de zinc peut prendre trois proportions d'eau et trois formes distinctes, suivant qu'on le fait cristalliser dans une dissolution chaude, dans une dissolution tempérée ou dans une dissolution convenablement refroidie.

Comme chaque forme primitive peut donner naissance à de nombreuses variétés de formes secondaires, on conçoit toutes les différences caractéristiques qu'une même substance peut offrir dans sa structure lorsqu'elle est ainsi obtenue par la voie humide, et toutes les différences encore plus tranchées qu'elle offrirait si l'on tenait compte des cristallisations confuses.

459. *Des fluides contenus dans les cavités des cristaux.* — Plusieurs substances, et particulièrement le quartz cristallin, présentent dans leur intérieur des cavités fermées de toutes parts, ou des *geodes* qui sont presque remplies de liquide. Sir H. Davy et quelques autres observateurs ont essayé dans ces derniers temps de déterminer la nature de ces liquides, celle des gaz qui les accompagnent ordinairement et les pressions sous lesquelles ils se trouvent. On pouvait espérer que ces recherches fourniraient quelques données importantes sur les circonstances qui ont déterminé la formation des geodes, et par conséquent la consolidation des substances dans lesquelles elles se trouvent. Mais jusqu'à présent les observations qui ont été faites sur ce sujet ne peuvent conduire à aucune conclusion décisive. Il résulte seulement des expériences de sir H. Davy : 1° Que les geodes sont assez hermétiquement fermées pour qu'on ne puisse rien y faire entrer, ni rien en faire sortir par des pressions mécaniques; 2° que le liquide qu'elles contiennent paraît être de l'eau assez pure pour ne donner aucun nuage dans le nitrate d'argent, ni dans d'autres réactifs; 3° que les fluides élastiques qui accompagnent l'eau ne sont autre chose que du gaz azote; 4° que dans cinq ou six geodes, ce gaz était à une pression sept ou huit fois moindre que la pression atmosphérique, et que dans une seule il s'est trouvé à une pression de deux ou trois atmosphères.

CHAPITRE III.

DE L'ÉLASTICITÉ.

460. Tous les corps sont élastiques, c'est-à-dire qu'ils peuvent tous, sans se rompre ou sans se désagréger, éprouver par des actions mécaniques quelques changements dans leur structure, leur forme ou leur volume, et reprendre exactement leur état primitif dès que ces puissances mécaniques cessent d'agir sur eux. Nous avons déjà fait voir (233) que les volumes des gaz dépendent des pressions qu'ils supportent, et qu'à température égale ils reprennent toujours le même volume sous la même pression; cette propriété constitue une espèce d'élasticité que nous appellerons *élasticité de compression*; c'est la seule dont jouisse les gaz, et à peu près la seule aussi dont paraissent jouir les liquides. Les solides la possèdent comme les liquides et les gaz, mais en outre ils peuvent être *fléchis ou allongés*, et reprendre leurs dimensions *ou leur forme*, ce qui constitue l'*élasticité de tension*; enfin ces corps peuvent être plus ou moins *tordus* sans cesser de revenir à leur disposition ou plutôt à leur structure primitive, ce qui constitue l'*élasticité de torsion*. Nous allons successivement étudier ces diverses propriétés.

461. *Compressibilité des gaz.* — La loi de Mariotte (233) n'avait été démontrée pour l'air que dans des limites assez restreintes; M. Oersted a essayé dernièrement de voir jusqu'à quelle pression elle peut s'étendre. L'une des plus grandes difficultés qui se présentent dans ce genre d'expérience, est de mesurer exactement les pressions qu'on exerce, car il n'y a pour cela que deux moyens : les soupapes chargées de différents poids ou les diverses hauteurs d'une colonne liquide. M. Oersted a choisi le premier, et le roi de Danemark a bien voulu favoriser l'importante entreprise de l'illustre savant de Copenhague, en lui confiant ses propres fusils à vent, avec leurs pompes et une très bonne balance. Les capacités des réservoirs dans lesquels on comprimait l'air, étaient déterminées par le poids de l'eau qu'elles pouvaient contenir; les quantités d'air qu'on y accumulait avec les pompes étaient pareillement déterminées par des pesées; enfin les pressions étaient évaluées par les poids que des soupapes de dimensions bien connues pouvaient supporter avant de s'ouvrir de dehors en dedans. Par ces

moyens M. Oersted a constaté que jusqu'à 60 atmosphères l'air reste soumis à la loi de Mariotte, c'est-à-dire que les volumes qu'il prend sont toujours en raison inverse des pressions qu'il supporte.

Ce résultat fondamental doit inspirer d'autant plus de confiance qu'il a été obtenu par un des plus habiles physiciens de notre temps.

Dans quelques autres expériences, M. Oersted avait poussé la pression jusqu'à 110 atmosphères (alors le réservoir contenait 101 grammes d'air); mais il paraît que la soupape éprouvait une espèce de flexion sous l'énorme poids dont il fallait alors la charger, et qu'elle n'était plus propre à donner des indications exactes.

Ainsi lorsqu'on ne dépasse pas 60 atmosphères, on peut en toute sécurité employer les manomètres à air pour mesurer les pressions. C'est le moyen que M. Oersted a proposé pour reconnaître si les gaz composés, et ceux qui se liquéfient aisément, suivent encore la loi de Mariotte dans leur compressibilité. Il en a même fait l'application au gaz sulfureux, qui se liquéfie à 3 atmosphères et demie, et il a constaté que ce gaz ne se comprime, suivant la loi de Mariotte, que jusqu'à 2 atm. 1/3 à peu près; passé ce terme, ses condensations deviennent de plus en plus rapides, tellement qu'elles sont de 3,3, lorsque celles de l'air ne sont que de 3,2.

Ces expériences se disposent de la manière suivante : On prend deux tubes bien calibrés et à peu près de même dimension, l'un est rempli d'air sec, l'autre de gaz sulfureux pareillement sec, et on les renverse dans une petite capsule de mercure. Ce double manomètre est porté dans un tube de verre très résistant, disposé verticalement, que l'on achève de remplir avec de l'eau; c'est sur l'eau de ce tube que l'on exerce la pression par un moyen quelconque; cette pression se communique au mercure et aux gaz, le manomètre à air en donne la mesure, et c'est par la comparaison de sa marche avec celle du manomètre voisin que l'on déduit la loi de condensation du gaz que celui-ci contient.

M. Despretz a employé le même appareil pour étendre les expériences de M. Oersted au cyano-

gène, à l'ammoniaque et à l'acide hydrosulfurique; il a trouvé que ces gaz sont comme l'acide sulfureux plus compressibles que l'air; ce résultat pris en général est très probable, mais les valeurs numériques que donne M. Despretz sont sans doute inexactes, puisqu'elles supposent que l'air lui-même ne se comprime pas suivant la loi de Mariotte.

Arrivée au point où elle a été portée par M. Ørsted, la question de la compressibilité des gaz devient une des plus intéressantes de la physique : il serait très important de savoir au-delà de 60 atmosphères la compression des gaz simples, et de déterminer avec précision la marche des gaz composés; car s'il est vrai, comme tout semble l'indiquer, que ceux-ci suivent une autre loi, il est extrêmement probable qu'ils suivraient aussi une autre loi de dilatation en les exposant à de très hautes températures.

462. *De la compressibilité des liquides et de la chaleur qui en résulte.* — C'est encore M. Ørsted qui nous servira de guide en ce que nous avons à dire sur ce sujet : l'appareil au moyen duquel il observe et mesure la compressibilité des liquides, est représenté dans les fig. 462 et 463; il se compose essentiellement d'un réservoir de compression *c*, fait en verre épais, et d'un réservoir à tube capillaire *xx* que l'on peut, avec quelques physiciens, appeler un *piézomètre*. M. Ørsted donne à peu près au piézomètre (Fig. 463) la forme et les dimensions d'un gros thermomètre cylindrique; seulement le tube reste ouvert et se termine par un entonnoir ou par un petit renflement. Un point important pour l'exactitude de l'instrument, est de graduer ce tube en parties égales, dont la capacité soit une fraction connue de la capacité du cylindre; pour cela on détermine le poids du mercure contenu dans le cylindre, qui sera par exemple, 1000 grammes, et le poids du mercure contenu dans une longueur donnée du tube, qui sera par exemple 2 décigrammes pour une longueur de 100 millimètres. Alors il est évident que la capacité correspondante à 1 millimètre du tube (supposé bien calibré) sera 0,000002 de la capacité du cylindre, et comme on peut lire aisément les demi-millimètres, soit sur le tube lui-même divisé au diamant, soit sur une échelle qui lui est adaptée, on pourra observer les millièmes du volume primitif.

Supposons maintenant qu'on veuille employer ce piézomètre à déterminer la compressibilité de l'eau : on le remplit de ce liquide bien purgé d'air, et par de légères variations de chaleur, on fait pénétrer dans le tube une petite colonne d'air, de mercure ou de carbure de soufre qui sépare et limite le volume d'eau sur lequel on veut opérer. Le piézomètre ainsi ajusté, on adapte à son échelle un petit manomètre à air *mm*, c'est-à-dire un tube cylindrique de 10 à 15 millimètres de diamètre, de 15 à 20 centimètres de longueur fermé en bout et ou-

vert en bas; on le porte dans le réservoir de compression préalablement rempli d'eau, comme il est représenté fig. 462, en prenant toutes les précautions nécessaires pour qu'il n'éprouve aucun changement sensible de température, car il ne faudrait peut-être qu'un demi-degré d'élévation pour repousser l'index dans l'entonnoir, et un ou deux degrés d'abaissement tout ou plus pour le faire tomber dans le cylindre. Il reste à comprimer la grande masse d'eau du réservoir, afin qu'elle transmette sa pression au liquide contenu dans le piézomètre au moyen de l'ouverture de l'entonnoir *t*; pour cela on visse la pompe *rr'* sur la forte virole en métal *vv'* qui termine le réservoir en verre, et l'on serre fortement avec la clef *v* pour intercepter tous les joints. On voit en *sa'* un tube par lequel on verse de l'eau jusqu'au piston *s*, et que l'on ferme ensuite; pendant ce temps-là, l'air s'échappe par l'ouverture latérale *o*, qui doit à son tour être fermée par le piston dès qu'il commence à descendre. Enfin cela fait, il suffit de tourner la traverse *tt'* pour faire descendre dans son écrou la vis *a*, qui pousse le piston devant elle, et alors on observe en même temps le manomètre *mm*, pour avoir la mesure de la pression, et l'index du piézomètre pour avoir la diminution de volume correspondante.

Voici maintenant les principaux résultats auxquels M. Ørsted est arrivé :

- 1°. Pour une pression de 1 atmosphère l'eau se comprime de 0,000045, c'est-à-dire des quarante-cinq millièmes de son volume primitif;
- 2°. Jusqu'à 70 atmosphères, la compressibilité reste proportionnelle aux forces comprimantes, en sorte que si cette loi se soutenait indéfiniment, une pression de 100 atmosphères ne produirait qu'une diminution de 0,0045 dans le volume primitif, et il faudrait plus de 10,000 atmosphères pour le réduire à moitié;
- 3°. La compressibilité du mercure ne dépasse guère un millième de son volume pour chaque atmosphère;
- 4°. Celle de l'alcool est de 20 millièmes;
- 5°. Celle du sulfure de carbone de 30 millièmes;
- 6°. Celle de l'éther sulfurique de 60 *id.*;
- 7°. Celle de l'eau, contenant des sels, des alcalis ou des acides, est un peu moindre que celle de l'eau pure.

Ces nombres sont les résultats directs de l'expérience, mais il se présente ici une question fondamentale qui a été l'objet de plusieurs discussions entre les physiciens, et qui paraît enfin complètement résolue par les recherches de M. Poisson sur l'élasticité des corps. On demande si le piézomètre, dont l'enveloppe est comprimée entre le liquide extérieur et le liquide intérieur, n'éprouve pas un changement sensible de capacité qui nécessite une correction dans les observations directes. M. Ørsted avait implicitement admis que cette correction pouvait être négligée, d'autres avaient pensé que l'en-

veloppe du piézomètre se comprime comme une simple plaque et qu'il en résulte une *augmentation de capacité*, dont il faut tenir compte; d'autres au contraire regardaient comme certain qu'un corps tout-à-fait solide de même forme et de même substance que le piézomètre, diminuant de volume par la compression, l'enveloppe seule doit diminuer exactement de la même quantité; qu'il en résulte par conséquent une *diminution de capacité* dont il faut corriger les résultats directs.

M. Poisson adopte cette dernière opinion, il en démontre la justesse comme nous le verrons (463), et de plus, il fait voir que si l'on représente par c la capacité primitive du piézomètre, cette capacité deviendra

$$c \left(1 - \frac{3f}{2} \right)$$

sous la pression P :

f étant la contraction qu'éprouverait dans sa longueur une tige de même substance que le piézomètre et supportant à ses deux bouts *seulement* la même pression P , rapportée à l'unité de surface.

Si au lieu de presser cette tige on la tire dans sa longueur avec le même effort, on admet en principe qu'elle prendrait le même allongement f ; ainsi, d'après les expériences de MM. Colladon et Sturm, une baguette de verre s'allongeait de 11 dix-millionièmes lorsqu'elle est tirée avec un effort égal à une atmosphère, c'est-à-dire avec un poids égal à celui d'une colonne de mercure de 760 millimètres de hauteur et d'une base égale à la section de la baguette, il en résulte que c étant la capacité d'un piézomètre de verre sous la pression ordinaire, cette capacité deviendra $c(1 - 0,00000165)$ sous une atmosphère de plus et $c \left(1 - 0,00000165 n \right)$ sous un nombre n d'atmosphères de plus. On voit, d'après cette théorie, que toute l'exactitude des expériences de compressibilité repose sur la détermination précise de la contraction en volume ou de l'allongement linéaire de la substance qui compose l'enveloppe du piézomètre.

On trouvera réunis dans le tableau suivant les résultats de M. Ørsted et ceux qui ont été obtenus par MM. Colladon et Sturm, dans le travail qui a été couronné par l'Académie des sciences (*Ann. de chim.*, 1827).

La 2^e colonne contient les nombres donnés par les observateurs, et la 3^e contient ces nombres corrigés d'après la formule précédente, en admettant 11 dix-millionièmes pour l'allongement linéaire du verre sous un poids équivalent à une atmosphère.

Cette correction augmente les nombres de M. Ørsted, parce qu'il avait supposé la capacité du piézomètre constante, et elle diminue ceux de MM. Colladon et Sturm, parce qu'ils avaient supposé que

la capacité augmente de $3f$ au lieu de $\frac{3f}{2}$.

Tableau de la compressibilité des liquides.

Noms des substances.	Compressibilité pour une atmosphère étalée en millièmes du volume primitif.	Comprimi- bilité corrigée.
M. ØRSTED.		
Mercur.	1	9,65
Alcool.	20	31,65
Sulfure de carbone. . .	30	31,65
Eau.	45	46,65
Ether sulfurique. . .	60	61,65
MM. COLLADON ET STURM.		
Mercur.	5,03	3,38
Acide sulfurique. . .	3,9	30,35
Acide nitrique. . . .	3,9	30,55
Ammoniac.	34,7	33,05
Acide acétique. . . .	42,9	40,55
Eau non privée d'air. .	49,5	47,85
Eau privée d'air. . . .	51,3	49,85
Ether nitrique.	71,5	69,85
Essence de térébenth.	73	71,35
Ether acétique.	79,3	77,65
Ether hydrochlorique.	85,9 p. la 1 ^{re} atm.	84,25
	82,25 p. la 2 ^e atm.	80,60
Alcool.	95,5 p. la 1 ^{re} atm.	94,95
	93,5 p. la 2 ^e atm.	91,85
	89, p. la 3 ^e atm.	87,35
Ether sulfurique à 0°.	133, p. la 1 ^{re} atm.	131,35
	127, p. la 2 ^e atm.	120,45
id. à 11°.	150, p. la 1 ^{re} atm.	148,35
	141, p. la 2 ^e atm.	139,55

On voit qu'en général les nombres de MM. Colladon et Sturm sont un peu plus forts que ceux de M. Ørsted. La différence est faible pour le mercure et pour l'eau; mais elle est considérable pour l'éther sulfurique, et bien plus grande encore pour l'alcool. Ces deux derniers liquides et l'éther hydrochlorique doaient lieu à une observation importante, c'est que la compressibilité diminue à mesure que la pression augmente; enfin l'on remarque une augmentation très sensible dans la compressibilité de l'éther sulfurique, depuis la température 0° jusqu'à la température de 11°.

La chaleur qui se dégage pendant la compression des liquides est toujours très difficile à observer. M. Ørsted n'a pas pu la rendre sensible. MM. Colladon et Sturm sont parvenus à faire marcher de 4 à 6° un thermomètre de Bréguet, en comprimant subitement l'éther sulfurique à grands coups de marteau. L'eau et l'alcool soumis à la même expérience n'ont produit aucune variation appréciable. Cependant comme des pressions de 30 à 36 atmosphères, produites un peu plus lentement que par le choc, faisaient marcher l'aiguille du thermomètre en sens contraire, on est forcé de supposer que la compression peut, indépendamment de toute

chaleur, modifier la lame métallique qui forme les spires, et qu'en conséquence il ne faudrait pas se fier aux indications de cet instrument.

M. Ørsted croyait avoir remarqué dans ses premières expériences que l'eau, plusieurs fois comprimée, perdait jusqu'à un certain point la propriété de revenir à son volume primitif; mais cette observation n'a point paru se confirmer par les expériences ultérieures. On peut donc admettre premièrement que les gaz et les liquides jouissent d'une *élasticité parfaite*; c'est-à-dire que les plus violentes pressions que l'on exerce sur eux, soit lentement, soit rapidement, sont toujours insuffisantes pour en altérer la structure d'une manière permanente, et que ces causes venant à cesser, ces fluides reprennent identiquement leur volume primitif; secondement que l'enveloppe solide du piézomètre jouit aussi d'une *élasticité parfaite* dans les conditions sous lesquelles on a expérimenté jusqu'à présent; car si elle se comprimait sensiblement d'une manière permanente, on n'obtiendrait pas sans doute les mêmes compressibilités avec un piézomètre neuf et un piézomètre qui aurait déjà été soumis à des pressions répétées.

463. *De la compressibilité des solides et de la résistance qu'ils opposent à l'écrasement.* — Il faut distinguer dans les solides la compressibilité permanente, et la compressibilité passagère qui disparaît avec la cause qui l'a produite. Nous avons vu dans le chapitre précédent que les métaux peuvent prendre par le travail une augmentation sensible de densité; ainsi ils se compriment par le choc du marteau ou du balancier, ou par la pression du laminoir; mais cette compressibilité est une preuve de leur imparfaite élasticité, puisqu'ils conservent l'empreinte des forces auxquelles ils ont été soumis, même quand ces forces ont cessé d'agir. Si l'or et l'argent étaient des corps parfaitement élastiques on pourrait bien les graver, mais on ne pourrait pas les frapper en monnaie ou en médailles. Ces considérations s'appliquant à la plupart des corps solides, on peut en conclure que sous certaines conditions ils sont compressibles sans retour et imparfaitement élastiques. Quand les corps solides ont été comprimés comme nous venons de le supposer, on dit que leurs molécules ont été *forcées* et qu'elles ont pris un nouvel arrangement; mais on admet en général qu'il y a pour chacun d'eux un certain degré de compression en-dessous duquel ils sont parfaitement élastiques et reviennent toujours à leur état primitif; c'est cette dernière espèce de compressibilité que nous occupera d'abord. Tout ce que l'on sait sur ce sujet délicat et important est dû aux recherches des géomètres; nous allons choisir, parmi les résultats curieux auxquels ils sont parvenus, ceux qui sont d'une utilité plus immédiate pour diriger les expérimentateurs; car, en cette matière, la théorie a devancé de beaucoup les expériences. (M. Poisson, *Mém. de l'Acad. des sciences, Ann. de Chimie*, 1827 et 1828.)

Lorsqu'une sphère creuse, homogène et d'une épaisseur constante (Fig. 464), est soumise en dehors et en dedans à des pressions données, on détermine de la manière suivante les changements qu'elle éprouve par l'effet de ces pressions.

Soit a la valeur primitive du rayon extérieur ak ,
 a' sa valeur après la compression,
 r la valeur primitive du rayon intérieur cr ,
 r' sa valeur après la compression,
 p la pression sur chaque unité de la surface extérieure,

p' la pression sur chaque unité de la surface intérieure,

λ une constante qui dépend de la nature de la substance, comme nous le verrons tout à l'heure :
 On a ces relations.

$$a' = a \left\{ 1 - \frac{4(n\lambda - hr^2) + 5(n-h)r^2}{20\lambda(n^3 - r^3)} \right\}$$

$$r' = r \left\{ 1 - \frac{4(n\lambda - hr^2) + 5(n-h)r^2}{20\lambda(n^3 - r^3)} \right\}$$

1°. Si la sphère creuse est également pressée en dehors et en dedans, on a $n = h$, et les valeurs de a' et r' se réduisent aux suivantes :

$$a' = a \left\{ 1 - \frac{r^2}{5\lambda} \right\}$$

$$r' = r \left\{ 1 - \frac{r^2}{5\lambda} \right\}$$

Ainsi dans ce cas, le grand et le petit rayon éprouvent proportionnellement la même contraction, et cette contraction est en raison directe de la pression et en raison inverse de la constante λ .

2°. Pour déduire de ces formules ce qui arrive à une sphère pleine, il suffit de faire $r = 0$; et l'on obtient alors :

$$a' = a \left\{ 1 - \frac{r^2}{5\lambda} \right\}$$

D'où il suit que sous la même pression, une sphère creuse et une sphère pleine, de même matière, éprouvent des contractions égales.

3°. Quand la pression intérieure est nulle ou $h = 0$, et les valeurs de a' et r' deviennent

$$a' = a \left\{ 1 - \frac{n(4n^2 + 5r^2)}{20\lambda(n^3 - r^3)} \right\}$$

$$r' = r \left\{ 1 - \frac{9nr^2}{20\lambda(n^3 - r^3)} \right\}$$

Alors le rayon extérieur éprouve une contraction toujours plus petite que le rayon intérieur, et lorsqu'il est très grand par rapport à celui-ci sa contraction n'en est

4
que les—
9.

4°. On peut toujours exercer à l'intérieur une pression telle que le rayon intérieur n'éprouve aucun changement; il suffit pour cela que le rapport de cette pression à la pression extérieure n soit le suivant :

$$\frac{h}{n} = \frac{9n^3}{5n^3 + 4r^3}$$

Le rapport des pressions qui produit cet effet dépend donc du rapport des rayons intérieurs et extérieurs. Quand on a par exemple $n=2r$, il suffit d'exercer en dedans une pression qui soit les 18/11 de la pression extérieure pour que le rayon intérieur n'éprouve aucun changement;

5°. On peut aussi exercer des pressions, telles que le rayon extérieur n reste le même; il suffit pour cela que l'on ait

$$\frac{h}{n} = \frac{4n^3 + 5r^3}{9r^3}$$

Par exemple, pour $n=2r$, on trouve

$$\frac{h}{n} = \frac{37}{9}$$

Ainsi, pour de tels rayons, il faudrait exercer en dedans une pression plus que quadruple de la pression extérieure pour que le rayon extérieur n'éprouvât pas de changement.

6°. Si la cavité intérieure de cette enveloppe sphérique était remplie d'une substance homogène solide ou liquide pour laquelle la constante analogue à λ eût une valeur λ' moindre ou plus grande que λ , les valeurs des rayons extérieurs et intérieurs deviendraient après la compression :

$$n' = n \left\{ 1 - \frac{n(4\lambda + 5\lambda')n^3 - 5n(\lambda' - \lambda)r^3}{5\lambda n} \right\}$$

$$r' = r \left\{ 1 - \frac{9n^3}{5\lambda} \right\}$$

La valeur de n est :

$$n = \lambda' (5n^3 + 4r^3) + 4\lambda (n^3 - r^3).$$

Or, la valeur de r' s'appliquant à la fois à la dernière couche intérieure de l'enveloppe nr (Fig. 464) et à la première couche extérieure du noyau cr , on voit en même temps la compressibilité qu'éprouve ce noyau; elle est dépendante de la constante λ' , qui appartient à sa substance.

Si $\lambda' = \lambda$, il est facile de voir que le noyau se comprime, comme si la pression extérieure n lui était immédiatement appliquée. Ainsi une sphère liquide se comprime suivant les mêmes lois qu'une sphère solide, et même elle se comprime de la même quantité lorsque la constante λ' de sa substance est la même.

Si $\lambda' = 0$, on retombe sur les valeurs de n' et r' que nous avons tout à l'heure pour $h=0$, ce qui

doit être encore, puisqu'en supposant $\lambda' = 0$, c'est attribuer à la substance du rayon une compressibilité indéfinie et sans résistance.

Pour toutes les valeurs de λ' comprises entre 0 et λ , les valeurs de n' et de r' sont comprises entre celles qui correspondent à $h=0$ et $h=n$; d'où il suit que le noyau est toujours moins comprimé que s'il avait reçu directement la pression n .

Enfin, si on a $\lambda' > \lambda$, les valeurs de n' et r' deviennent analogues à ce qu'elles sont pour $h > n$; c'est-à-dire que l'on peut toujours trouver une valeur de h supérieure à n , qui donnerait à n' et à r' les mêmes valeurs que la supposition $\lambda' > \lambda$; et si l'on cherche alors l'effet que produirait la pression extérieure n en l'appliquant directement au noyau, on le trouverait toujours moindre que l'effet qu'elle produit par l'intermédiaire de l'enveloppe solide. Ce résultat singulier peut se concevoir en observant que si le noyau est moins compressible que l'enveloppe sphérique, il empêche le rayon intérieur cr de prendre toute la diminution qu'il devrait prendre, et il agit alors comme une certaine pression intérieure plus grande que la pression extérieure. La limite de cet effet s'obtient en supposant $\lambda' = \infty$, c'est-à-dire en supposant que le noyau est absolument incompressible : alors le rayon intérieur est constant; et comme on le rend constant aussi avec

une pression $h = n \frac{9n^3}{5n^3 + 4r^3}$ il est évi-

dent que le noyau doit recevoir cette pression. Voilà comment il se trouve plus comprimé que s'il recevait directement la pression extérieure n .

Pour vérifier par l'expérience ces déductions de la théorie, il faut pouvoir déterminer la valeur de la constante λ qui caractérise chaque substance par rapport à sa compressibilité. M. Poisson donne pour cela la formule suivante,

$$\lambda = \frac{2L}{5\alpha s} \left(r + \frac{r'}{2} \right)$$

qui est d'une application facile pour les substances qui peuvent être réduites en fil ou en tiges. Car, si l'on fait un fil dont la longueur soit L , le poids P , la section s , et qu'après l'avoir fixé verticalement par son extrémité supérieure on le charge à son extrémité inférieure d'un poids r , puis qu'on observe l'allongement α qu'il éprouve, il suffira de substituer toutes ces données dans la formule pour avoir la valeur de λ .

Comme on admet en principe dans toute cette théorie que la compressibilité qui est produite par certaines forces est toujours égale à l'extensibilité qui serait produite par les mêmes forces, agissant de la même manière et en sens contraire, on voit que la formule précédente pourrait donner aussi la valeur de λ au moyen de la compressibilité. Car,

en négligeant $\frac{r'}{2}$, qui sera toujours très petit par

rapport à r , et en supposant que le poids r comprime la tige dans le sens de sa longueur, et que α désigne alors la contraction, l'on aura :

$$\alpha = \frac{2 L r}{5 a s}$$

Le poids r s'exerçant sur la surface s , il en résulte que la pression n sur l'unité de surface est $n = \frac{r}{s}$,

et en faisant aussi $L = 1$ on a :

$$\alpha = \frac{2 n}{5 a}$$

Cette formule établit une relation remarquable entre la contraction α qu'éprouve une tige pressée par ses bouts et libre par son contour, et celle qu'éprouve une sphère de même substance supportant la même pression n sur toute sa surface ; car nous avons trouvé pour ce dernier cas

$$\alpha' = n \left(1 - \frac{n}{5 a} \right)$$

qui devient, par la substitution de α ,

$$\alpha' = n \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right)$$

ce qui fait voir que la contraction qu'éprouve une tige pressée seulement par ses bouts, est double de celle qu'éprouve la même tige pressée avec la même force sur tous les points de sa surface.

Le volume de la sphère comprimée est sensiblement $v \left(1 - \frac{3\alpha}{2} \right)$, v étant son volume primitif.

D'où il suit enfin que, si l'on connaît l'allongement linéaire α d'une substance tirée à ses bouts par une certaine force, il en faudra prendre la moitié pour avoir la contraction linéaire de cette même substance pressée sur tous ses points par la même force, et les $\frac{3}{2}$ pour avoir sa contraction de volume. C'est d'après ces principes que nous avons corrigé précédemment les observations piézométriques.

En comprimant les solides au-delà des limites de leur parfaite élasticité, ils restent plus ou moins comprimés et prennent des densités croissantes, qui ont été jusqu'à présent très peu étudiées. Si la compression continuait indéfiniment sans cesser d'être égale sur tous les points de la surface, il paraît qu'à la fin la plupart des solides se briseraient en poussière ; mais quand les pressions sont inégales, il ne faut pas de grands efforts pour écraser les substances les plus résistantes. Comme il est souvent utile, soit pour les recherches physiques, soit pour les applications des arts, d'avoir quelques données sur ces propriétés des solides, nous avons

rassemblé dans le tableau suivant plusieurs résultats qui ont été obtenus par M. Rondelet et par M. G. Rennie. Ils sont extraits de l'ouvrage de M. Navier (*Résumé des leçons données à l'École royale des ponts et chaussées*).

Résistance des pierres à l'écrasement, d'après les expériences de M. Rondelet, sur des cubes de 5 centimètres de côté.

Indication des pierres.	Densité.	Poids produisant l'écrasement.
		kilogrammes.
Balsate d'Auvergne.	2,88	51945
Grès blanc.	2,48	23086
Marbre noir de Flandre.	2,72	19719
Granit de Normandie, dit <i>gontines</i>	2,66	17555
Granit gris de Bretagne.	2,74	16353
Pierre noire de Saut-Fortunat employée à Lyon, très dure et coquilleuse.	2,65	15668
Granit vert des Vosges.	2,85	15487
Lias de Bagneux, près de Paris, très dur, d'un grain fin.	2,44	11113
Marbre blanc statuaire.	2,69	8176
Roche d'Arcueil, près de Paris.	2,08	6334
Roche de Chatillog, près de Paris, dure, et un peu coquilleuse.	2,29	4347
Pierre de Saillasscourt, près de Pontoise, 1 ^{re} qualité.	2,41	3536
2 ^e qualité.	2,29	2994
3 ^e qualité.	2,10	2304
Pierre ferme de Conflans employée à Paris.	2,07	2245
Pierre à plâtre du Montmartre, près de Paris.	1,92	1785
Vergelée des environs de Paris, tendre, d'un grain grossier, résistant à l'eau.	1,33	1496
Pierre tendre ou lambourde de Conflans, 1 ^{re} qualité.	1,82	1407
Lambourde de qualité inférieure, tendre, résistant mal à l'humidité.	1,56	575
Grès tendre.	2,49	98

Résistance des bois à l'écrasement, d'après les expériences de M. G. Rennie, sur des cubes de 1 pouce anglais de côté.

Bois.	Poids produisant l'écrasement en livres et en grains.
Chêne anglais.	3860
Sapin blanc.	1928
Pin d'Amérique.	1606
Orme.	1284

Résistance des métaux à l'écrasement, d'après les expériences de M. G. Reanne, sur des cubes de 1/4 de pouce anglais de côté.

Métaux.	Poids produisant l'écrasement en	
	Densités.	liv. st. du poids.
Fer tiré du centre d'une large masse.	7,033	9773
Fer tiré de barres coulées horizontalement.	7,113	10114
Fer tiré de barres coulées verticalement.	7,074	11137
Cuivre coulé.	"	7318

Le livre avoit du poids vaut en kilog. 0^k,45355, et le ponce anglais vaut 25^{mm},3999.

Il serait facile avec ces données de calculer la hauteur qu'il faudrait donner à une colonne pour que sa base fût écrasée par son poids. On trouverait, par exemple, pour le basalte d'Auvergne, une hauteur de 7215 mètres, c'est-à-dire environ deux lieues. Ainsi on en pourrait conclure qu'une montagne cylindrique du basalte se briserait par son poids si elle avoit deux lieues de hauteur, depuis son sommet jusqu'au sol; mais au-dessous du sol les pressions latérales soutiennent une partie de la charge.

461. *De l'élasticité de tension et de la ténacité.* — Les corps solides travaillés en fils, ou tiges ou en barres, éprouvent divers phénomènes lorsqu'ils sont tirés dans le sens de leur axe par des forces successivement croissantes : 1^o leur longueur augmente et leur diamètre diminue; 2^o ils reviennent exactement à leurs dimensions primitives quand les forces tractives viennent à cesser sans avoir dépassé certaines limites; 3^o au-delà de ces limites ils restent allongés dans un sens et rétrécis dans l'autre; 4^o pour des forces plus grandes encore ils se rompent, tantôt brusquement dans toute leur largeur, tantôt lentement en s'amincissant de plus en plus.

1^o. Il est naturel de supposer que pendant la traction le volume du corps augmente à peu près comme il diminue pendant la compression. C'est, en effet, ce que M. Cagniard La Tour a observé en tirant un fil de cuivre dans un long tube rempli d'eau et convenablement disposé; et M. Poisson a démontré que, si l'on représente en général par a l'allongement que prend par la traction un cylindre dont la longueur est l'unité, le rétrécissement dans le sens perpendiculaire à l'axe sera seulement $\frac{a}{4}$. De telle sorte que le volume primitif étant v , le volume pendant la traction sera

$$v \left(1 + \frac{a}{4} \right)$$

2^o. C'est, je crois, S'Gravesande qui a le premier établi les lois fondamentales de l'élasticité de tension des fils. L'appareil dont il se servait reposait sur les principes suivants : le fil est tendu horizontalement entre deux points fixes r et r' (Fig. 465); vers son milieu on pose un petit plateau de balance au moyen d'un crochet c ; mais pour que ce premier poids ne donne aucune flexion au fil, on l'équilibre au moyen d'un contre-poids soutenu par un fil de soie et passant sur une petite poulie p , au centre de laquelle est fixée une aiguille a . Cela fait, on observe la position de l'aiguille sur le cadran divisé en n et n' , et l'on commence à mettre doucement des charges successives dans le plateau du crochet; le fil se tend et se courbe de plus en plus; il en résulte une flèche n et n' , dont on détermine la longueur par le nombre des divisions que l'aiguille a parcourues, et il suffit alors de calculer les triangles r et n et r' et n' pour en déduire la longueur actuelle r et r' du fil. Quant à la tension qu'il éprouve, on la déduit, par les règles ordinaires de la mécanique, des poids additionnels dont on a chargé le plateau, en tenant compte, s'il est nécessaire, du poids du fil lui-même. Au moyen de cet appareil S'Gravesande a démontré d'abord que l'élasticité de tension est parfaite entre certaines limites dans les fils et dans les lames; car ils reviennent exactement dès que la force de traction est supprimée, et ensuite il a reconnu qu'entre ces limites les allongements sont proportionnels aux forces de traction.

3^o. Les fils qui ont été forcés, c'est-à-dire qui ont conservé une partie de l'allongement qu'ils avaient reçu par la traction, ne cessent pas pour cela d'être élastiques. Ce nouvel état est analogue à l'état primitif, et ils y reviennent aussi entre certaines limites. Il ne faut pas s'étonner d'après cela, que dans un même fil on trouve des parties plus ou moins élastiques et plus ou moins denses.

4^o. La ténacité des corps est la résistance qu'ils opposent à la rupture lorsqu'ils sont tirés dans le sens de leur longueur. Soit s , le nombre des millimètres carrés de la section perpendiculaire à l'axe d'un fil, d'une tige, ou en général d'un corps prismatique; soit k , le nombre des kilogrammes nécessaires pour produire la rupture par la traction. En admettant que l'effort se partage également entre tous les millimètres carrés de la section a ,

il est évident que $\frac{k}{s}$ sera l'effort supporté par 1 mil-

limètre carré; c'est en général cette expression que l'on prend pour la mesure de la ténacité. Ainsi une substance aura une ténacité double d'une autre

quand la valeur de $\frac{k}{s}$ sera pour la première double de ce qu'elle est pour la seconde.

Ténacité de diverses substances, ou nombre de kilogrammes que supporte 1 millimètre carré.

Noms des substances.	Ténacité moyenne.	Noms des observateurs.
MM.		
Fer en fil, non recuit. 50 à 87 . . .	68	Seguin aîné.
N° 1 à 23 (Franche-Comté).		
Fer en fil, non recuit. 50 à 84 . . .	67	Dufour.
N° 4 à 19 (Ferrière, St-Gingolf).		
Fer en fil (Bourgogne).	60	Buffan.
Fer en fil (anglais).	64	Telford.
Fer en fil, recuit	36 à 44	envir. 40
Fer en barres carrées		
ou rectangulaires. 30 à 60 . . .	45	Seguin aîné.
Id.	32 à 56 . . .	43 Peronnet.
Id.	47	Sonfflot et Rondelet.
Id (anglais)	46	Telford.
Fer fondu.	14	Brown.
Fer fondu horizontalement.	13	G. Rennie.
Fer fondu verticalement	14	Id.
Barres d'acier blattées (anglais). . .	28	Brown.
Id. fondu Id.	44	Id.
Tôle dans le sens du laminage.	36 à 45 . . .	41 Navier.
Id. perpendiculairement au laminage	33 à 39 . . .	36 Id.
Laiton en fil, non recuit.	40 à 80 . . .	60 Dufour.
Id. en fil, recuit	20 à 40	envir. 30 Id.
Cuivre rouge laminé.	21	Navier.
Plomb laminé.	1,35	Id.
Verre, en tige ou en tube.	1,7 à 3,3 . . .	2,5 Id.

On voit sur les fils de fer et de laiton que le recuit diminue singulièrement la ténacité, puisqu'il la réduit presque à moitié. Les tableaux complets de M. Seguin font voir aussi que la ténacité des fils augmente à mesure que leurs diamètres diminuent, à moins qu'ils ne deviennent trop fins : ces deux circonstances sont sans doute liées entre elles.

465. *De la résistance du corps à la flexion.* — Lorsqu'on fléchit un corps dans les limites de son élasticité, il reprend exactement sa forme dès que la cause a cessé. Pendant la flexion, il éprouve à la fois une traction et une compression, car toutes les fibres ou tous les filets que l'on peut alors concevoir sur la surface convexe sont évidemment allongés, tandis qu'ils sont sur la surface concave raccourcis ou comprimés, et il faut nécessairement qu'il s'en trouve entre ces deux positions qui n'éprouvent ni allongement ni contraction. C'est ce que l'on voit (Fig. 466) sur le cylindre λ , encastré par son extrémité α , et tiré par un poids à son extrémité β . Les filets $\alpha\beta$ sont allongés, les filets $\alpha'\beta'$ sont raccourcis, et les filets qui conservent

leur longueur forment une certaine surface, telle que $pprs$. C'est donc en vertu de la double élasticité de tension et de compression que le cylindre λ se redresse quand on supprime le poids r . Ce que nous disons ici d'un cylindre s'étend à un corps prismatique quelconque, on encastré ou posé sur deux appuis. Mais l'on n'a fait sur ce sujet que des recherches pratiques pour connaître la force des matériaux de construction ou des recherches mathématiques, dont nous ne pouvons rendre compte ici (voyez l'ouvrage de M. Navier). Nous devons donc nous borner à rappeler ce sujet à l'attention des physiciens : en l'étudiant par la voie de l'expérience on parviendra sans doute à déterminer d'une manière plus sûre et plus facile le coefficient d'élasticité de tension et celui d'élasticité de compression, à faire voir directement s'ils sont égaux comme on le suppose ou s'ils peuvent différer sous certaines conditions ; et l'on pourra au moins vérifier plusieurs résultats importants qu'il serait difficile de soumettre à l'épreuve par d'autres moyens.

466. *De la résistance des vases.* — Pour prendre une idée de l'effet que produisent les liquides sur les parois des vases, concevons un anneau $ATBC$ (Fig. 466 bis) ou plutôt un fil flexible dont tous les points soient pressés de dedans en dehors par des forces égales ca , ct , etc. S'il est élastique, il est évident que toutes ces forces normales tendront à l'étendre d'abord et ensuite à le rompre ; ainsi elles se transforment en forces tangentielles, telles que tr et tr' , qui agissent directement pour séparer la substance comme une traction agit dans le sens de la longueur d'un fil pour en opérer la rupture. On démontre en mécanique les lois suivant lesquelles s'accomplit cette transformation de forces normales en forces tangentes, et l'on arrive à cette conséquence, sur laquelle nous allons nous appuyer : que la tension T , qui s'exerce suivant les tangentes tr , tr' , est égale à la pression normale r qui s'exerce suivant ca , ct , etc., multipliée par le rayon ρ de l'anneau ; c'est ce qui est exprimé par l'équation

$$T = r \rho.$$

Si nous considérons maintenant un tuyau cylindrique horizontal, rempli d'un liquide qui s'écoule sous une pression quelconque, chacune de ses sections perpendiculaires éprouve des pressions normales comme l'anneau dont nous venons de parler, et il en résulte aussi une tension ou un effort qui tend à rompre ses parois parallèlement à l'axe. On aura donc

$$T = r \rho ;$$

T étant la tension, r la pression sur l'unité de surface ou sur 1 millimètre carré, et ρ le demi-diamètre du tuyau, évalué aussi en millimètres.

Les parois n'éprouvent aucune pression dans le sens de la longueur, si nous supposons que le liquide s'écoule librement par les deux bouts.

Soit λ l'épaisseur du tuyau en millimètres, et T'

la ténacité de sa substance pour 1 millimètre carré; on aura $\tau'x$ pour le nombre des kilogrammes que pourrait supporter sans se rompre une tranche du tuyau perpendiculaire à l'axe et d'un millimètre de longueur. Il faudra donc que la tension τ , qu'il éprouve, soit tout un plus égale à $\tau'x$. Ce qui donne

$$\tau = \tau'x,$$

et en vertu de l'équation précédente

$$\tau'x = rR;$$

$$\text{d'où} \quad R = \frac{\tau x}{\tau'}.$$

C'est l'épaisseur qu'il faut donner à un tuyau pour qu'il soit à la limite de ce qu'il peut supporter sans éclater. Ainsi cette épaisseur est en raison directe de la pression intérieure et du rayon, mais en raison inverse de la ténacité.

Pour prendre un exemple, nous chercherons sous quelle pression doit se rompre un tuyau de plomb de 5 millimètres d'épaisseur et de 25 millimètres de rayon intérieur, la ténacité du plomb étant, comme nous avons vu, 1^k,35.

On trouve en faisant le calcul $r = 0^k,27$.

Or, une atmosphère exerçant une pression de 0^k,01 sur un millimètre carré, il en résulte que le tuyau pourra supporter 27 atmosphères. M. Jardine d'Edimbourg a en effet trouvé qu'un tuyau de plomb ayant à peu près les dimensions précédentes supportait, sans altération apparente, une pression de 800 pieds d'eau, c'est-à-dire environ 24 atmosphères et demie, et qu'il éclatait sous 1000 pieds (onglais), c'est-à-dire sous 30 atmosphères environ. Si le diamètre du tuyau eût été double il n'aurait pu supporter que 13 atmosphères.

Dans les tuyaux fermés par les deux bouts les pressions qui supportent les bases terminales produisent une traction sur la longueur, et il est facile de voir que cette traction, rapportée à l'unité de

$$\text{surface, est } \frac{rR}{2}, \text{ ou la moitié seulement de celle}$$

qui agit pour faire éclater le tuyau parallèlement à l'axe.

Par la même raison, la tension qui s'exerce sur chaque unité de surface dans un vase sphérique

$$\text{est aussi } \frac{rR}{2}, \text{ et la relation qui existe entre la pres-}$$

sion limite τ , l'épaisseur x , le rayon R et la ténacité τ' est alors

$$x = \frac{rR}{2\tau'}.$$

La moindre ténacité de la tôle étant de 36^k,4 par millimètre carré, on voit qu'une sphère, de 168 millimètres de diamètre, faite avec de la tôle de 2,6 d'épaisseur, doit éclater quand la pression τ est de 1^k,13 par millimètre carré; c'est-à-dire environ 113 atmosphères. M. Navier a en effet trouvé

qu'une sphère de très bonne tôle ayant les dimensions précédentes a éclaté sous 140 atmosphères; la ténacité de sa substance était sans doute un peu plus grande que 36,4.

Nous nous bornerons à ces exemples. On trouvera dans l'ouvrage de M. Navier une théorie complète de la résistance des vases, fondée sur des considérations très simples et très ingénieuses.

467. *De l'élasticité de torsion.* — La facilité avec laquelle les fils fins de métal peuvent être tordus, et la régularité parfaite avec laquelle ils reviennent sur eux-mêmes pour reprendre leur position primitive, ont conduit les physiiciens à plusieurs découvertes importantes.

C'est Coulomb qui a le premier observé cette propriété avec l'attention qu'elle mérite, et c'est lui aussi qui en a fait le premier les applications les plus heureuses, en déterminant, dans sa balance de torsion, les lois fondamentales des fluides électriques et magnétiques (312 et 371). Quelques années plus tard, Cavendish parvint de son côté à un résultat plus extraordinaire encore, puisqu'il déterminait la densité et par suite le poids de la terre au moyen de la torsion d'un petit fil d'argent de quelques décimètres de longueur et de quelques centièmes de millimètres de diamètre (58).

Avant de rapporter les lois expérimentales de la torsion, telles que Coulomb les a observées dans la soie, les cheveux et les fils fins de métal, nous décrirons l'appareil dont on peut se servir pour ces recherches délicates (Fig. 467).

rr' , pied de l'appareil portant trois vis calantes.

$\tau\tau'$, tube vertical de laiton très résistant.

$c\ c'$, curseur inférieur terminé en c' par un diaphragme qui peut être divisé en degrés, ou sur lequel on adapte une division circulaire.

ss' , curseur supérieur terminé en s' par une pince au moyen de laquelle on fixe l'extrémité du fil.

$n\ n'$, pince qui arrête l'extrémité inférieure du fil, et peut se visser sur des cylindres de différents poids ou de différents rayons. Ces cylindres peuvent être en métal lorsqu'on fait les expériences sur des fils de métal, mais pour la soie ou les cheveux, il convient qu'ils soient en bois ou en ivoire.

Voici maintenant les lois générales que l'on peut constater par l'expérience.

1^{re}. *En chargeant un fil de différents poids il s'arrête en général dans des positions de stabilité différentes.*

Quelquefois cette variation peut s'étendre jusqu'à une demi-circonférence, ou même jusqu'à une circonférence entière.

Pour constater ce résultat, on adapte à la pince inférieure une espèce de petit plateau de balance dans lequel on ajoute des poids successifs, en notant à chaque fois la position d'un point de repaire à l'égard de la circonférence divisée du disque c' dont le centre est sur le prolongement du fil. Un assemblage de plusieurs fils présente le même phé-

nomène ; ainsi, quand on suspend, par exemple, une aiguille aimantée à un faisceau de soie plate, il importe de trouver d'avance la position d'équilibre de ce fil composé en y suspendant un poids égal à celui de l'aiguille aimantée qu'il doit porter. Un poids plus fort ou plus faible lui donnerait une torsion qui pourrait probablement exercer une influence sensible sur l'amplitude des variations diurnes.

2°. *Les oscillations du fil sont isochrones.*

C'est-à-dire qu'elles s'accomplissent toutes dans le même temps, quelle que soit leur amplitude, pourvu toutefois que cette amplitude ne dépasse pas une certaine limite qui dépend de la nature et de la longueur du fil. Par exemple, pour un fil de fer de 9 pouces de longueur et d'un diamètre tel que 6 pieds de longueur ne pèsent que 5 grains, les oscillations sont très sensiblement isochrones quand leur amplitude ne dépasse pas une demi-circonférence ; mais si l'écart primitif était de 3 circonférences entières, il en résulterait des oscillations de 6 circonférences qui seraient plus lentes que les premières d'environ $1/20$ ou $1/30$. Dans tout ce qui va suivre, nous ne parlerons que des oscillations *très petites*, c'est-à-dire *isochrones*.

Pour vérifier par l'expérience cette loi de l'isochronisme, on se sert de l'appareil précédent, (Fig. 467), on attache le fil à la pince supérieure, on le charge d'un poids de forme cylindrique assez fort pour le *tendre* et trop faible pour l'*étirer*, et quand l'équilibre est bien établi, on tourne le cylindre de 30, de 100 ou même de 180°, avec la précaution de le maintenir dans son axe, qui est aussi l'axe du fil ; ensuite on l'abandonne à lui-même ; les oscillations commencent, on les compte à partir d'un instant donné, au moyen d'un repaire ou d'un index qui est adapté au cylindre, et l'on mesure le temps avec une bonne montre à secondes.

On démontre par les principes de la mécanique, que les oscillations étant isochrones, il faut nécessairement que *la force de torsion qui les produit soit proportionnelle à l'angle de torsion*. Cette vérité fondamentale pourrait aussi se démontrer directement par l'expérience : il suffirait pour cela de remarquer que la force avec laquelle le magnétisme de la terre tend à ramener une aiguille aimantée dans le méridien magnétique, est évidemment proportionnelle au sinus de l'angle que cette aiguille fait avec le méridien, ou à l'angle lui-même s'il ne dépasse pas 8 ou 10°. Ainsi, une aiguille aimantée horizontale étant en repos dans la balance de torsion, et bien dirigée dans le plan du méridien magnétique (n° 312), il faudra pour l'en écarter de 3° par exemple, tourner le micromètre supérieur de 47°, et le tourner de 94 pour l'en écarter de 6°. Dans le 1^{er} cas, l'angle de torsion est de $47-3=44^\circ$, et dans le 2^e cas, il est de $94-6=88^\circ$. Mais la seconde force de torsion doit être double de la première puisqu'elle balance

une force magnétique dont l'effet est double. Donc la force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion.

3°. *Les durées des oscillations sont entre elles comme les racines carrées des poids qui tendent le fil.*

Cette vérité ne peut être constatée avec une grande exactitude que sur les fils qui ont en même temps assez de souplesse pour être tendus par un poids très faible, et assez de ténacité pour supporter un poids considérable sans être *étirés*. Car on peut alors, entre ces deux limites, prendre des poids qui soient entre eux, par exemple, comme les nombres 1, 4, 9, 16, 25, et reconnaître par des oscillations analogues aux précédentes, que les durées des oscillations sont entre elles comme les nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que tous ces poids divers doivent être essentiellement des cylindres de même rayon, ayant aussi des surfaces également polies.

On démontre par les principes de mécanique, que cette 3^e loi ne peut subsister qu'autant que *la force de torsion d'un fil reste exactement la même sous les différents poids qui le tendent*.

4°. *Les durées des oscillations sont entre elles comme les racines carrées des longueurs du fil.*

C'est-à-dire, que si l'on prend diverses longueurs d'un même fil, qu'on les ajuste successivement à l'appareil (fig. 467), de manière que les longueurs comprises entre les deux pinces soient entre elles comme les nombres 1, 4, 9, 16, 25, etc., et qu'on les fasse osciller après les avoir chargées du même poids, les durées des oscillations seront entre elles comme les nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc.

Puisque la durée des oscillations augmente avec la longueur du fil, il est évident que la force de torsion diminue, et l'on démontre théoriquement qu'elle diminue comme la longueur du fil augmente, car cette hypothèse est la seule qui reproduise la loi expérimentale précédente.

Au reste, on peut se rendre compte de cette vérité théorique en observant que, pour un même angle de torsion, l'écartement des molécules est véritablement réduit à la moitié quand la longueur du fil est double, au tiers quand elle est triple, etc., et qu'il est tout simple que la force de torsion soit alors réduite à la moitié, au tiers, etc., puisque cela prouve seulement qu'elle est proportionnelle à l'écartement des molécules, comme on pourrait le supposer *a priori*.

5°. *Les durées des oscillations sont en raison inverse des carrés des diamètres des fils.*

C'est-à-dire que si l'on prend successivement des fils de *même substance* et de *même longueur*, dont les diamètres soient entre eux comme les nombres 1, 2, 3, 4, et qu'on les fasse osciller après les avoir chargés des *mêmes poids*, les durées des oscillations seront entre elles en raison inverse des nombres 1, 4, 9, 16, etc.

On en conclut par la théorie que les forces de torsion sont entre elles comme les quatrièmes puissances des diamètres des fils, car les forces de torsion sont en raison inverse des carrés des temps d'une oscillation.

468. Après avoir rapporté les lois expérimentales de la torsion et les avoir rapprochées des lois théoriques auxquelles elles se trouvent nécessairement liées, il n'est peut-être pas inutile de donner ici la formule générale qui comprend tous ces résultats. Cette formule est la suivante :

$$T^2 = \frac{\pi^2 r^2 a^2}{2g\tau}$$

π , rapport approché de la circonférence au diamètre 3,141592.

g , gravité, à Paris, en 0^m, 8088, en prenant le mètre pour unité de longueur, et la seconde sexagésimale pour unité de temps.

τ , durée d'une oscillation évaluée en secondes.

r , poids cylindrique qui tend le fil.

a , rayon du cylindre dont le poids est r , il doit être évalué en mètres.

τ , force de torsion du fil, c'est-à-dire l'effort qu'il faudrait exercer à l'extrémité d'un levier d'un mètre de longueur pour le maintenir tordu d'un arc dont la valeur rectiligne serait aussi un mètre en le comptant sur une circonférence d'un mètre de rayon. Ainsi, la force de torsion est exprimée par un poids, et elle est évaluée en grammes ou en kilogrammes, suivant que l'on a évalué le poids r au moyen de l'une ou l'autre de ces unités.

Cette formule peut servir à calculer la valeur absolue de la force de torsion, et à mettre en évidence les différents rapports qui existent entre cette force et la durée des oscillations, leur amplitude, le poids cylindrique qui tord le fil et son rayon.

Par exemple, dans une expérience de Coulemb sur un fil de fer n° 12, dont le mètre de longueur pesait 100 milligrammes, on avait

$$\tau = 12'', 1; r = 979,012; a = 0,02143.$$

La longueur du fil était seulement de 0^m,0203.

On trouve au moyen de ces données, que sa force de torsion était telle, que pour le maintenir tordu d'une circonférence entière; il aurait fallu exercer un effort de 0^m 00908, ou d'environ 1 centigramme, à l'extrémité d'un bras de levier de 1 mètre de longueur.

La formule précédente s'obtient, en supposant que la force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion, et comme elle exprime que la durée des oscillations est indépendante de l'amplitude, on en conclut réciproquement que l'expérience indiquent l'isochronisme des oscillations, il faut que la force de torsion soit proportionnelle à l'angle de torsion.

Pour le même fil tendu par des poids cylindriques r et r' , de même rayon, on aurait

$$T^2 = \frac{\pi^2 r^2 a^2}{2g\tau} \text{ et } T'^2 = \frac{\pi^2 r'^2 a^2}{2g\tau'}$$

Et puisque l'expérience donne

$$\frac{T^2}{T'^2} = \frac{r}{r'} \text{ ou } \frac{T}{T'} = \sqrt{\frac{r}{r'}}$$

On en conclut $\tau = r'$; c'est-à-dire que les forces de torsion d'un fil sont indépendantes des poids qui le tendent.

Pour des longueurs inégales du même fil tendues par le même poids, on aurait

$$T^2 = \frac{\pi^2 r^2 a^2}{2g\tau} \text{ et } T'^2 = \frac{\pi^2 r^2 a^2}{2g\tau'}$$

$$\text{ou } \frac{T^2}{T'^2} = \frac{\tau}{\tau'}$$

Et puisque l'expérience donne

$$\frac{T^2}{T'^2} = \frac{L}{L'} \text{ ou } \frac{T}{T'} = \sqrt{\frac{L}{L'}}$$

L et L' étant deux longueurs différentes du même fil, on en conclut

$$\frac{r'}{r} = \frac{L}{L'}$$

C'est-à-dire que les forces de torsion sont en raison inverse des longueurs.

Enfin, deux fils de même substance et de différents diamètres a et a' étant tendus par le même poids, on aurait

$$\frac{T^2}{T'^2} = \frac{r}{r'}$$

Et comme l'expérience donne

$$\frac{T}{T'} = \frac{D^2}{D'^2} \text{ ou } \frac{T^2}{T'^2} = \frac{D^4}{D'^4}$$

On en conclut

$$\frac{r'}{r} = \frac{D^4}{D'^4}$$

C'est-à-dire que les forces de torsion sont en raison inverse des quatrièmes puissances des diamètres.

On peut remarquer encore que si le même fil était tendu successivement par deux poids égaux, mais de rayons différents a et a' , on aurait

$$T^2 = \frac{\pi^2 r^2 a^2}{2g\tau} \quad T'^2 = \frac{\pi^2 r^2 a'^2}{2g\tau'}$$

$$\text{d'où } \frac{T^2}{T'^2} = \frac{a^2}{a'^2} \text{ ou } \frac{T}{T'} = \frac{a}{a'}$$

C'est-à-dire que, dans ces circonstances, les durées des oscillations sont proportionnelles aux rayons des poids qui tendent le fil.

469. Toutes ces lois sont sans doute restreintes aux cas où les fils ont des dimensions assez petites pour que les actions moléculaires, qui constituent l'élasticité de torsion, puissent s'exercer identiquement.

ment de la même manière dans toute l'étendue de leur masse. Quand ces conditions ne sont pas remplies, les phénomènes sont beaucoup plus compliqués, et tout ce que l'on peut faire alors, c'est de multiplier les expériences, afin de pouvoir au moins établir entre eux quelque analogie probable. C'est dans cette vue que nous rapporterons ici les tableaux des principaux résultats qui ont été obtenus sur ce sujet en France et en Angleterre; ces tableaux offrent d'ailleurs l'avantage de contenir plusieurs nombres qui peuvent être utiles dans la pratique.

Tableau de la résistance que le fer forgé oppose à la torsion, d'après M. DUKEU.

DÉSIGNATION DES FERS.	Longueur en mètres.	Grossueur en millimètres.	Angle de torsion produit par un poids de 100, agissant à l'ex- trémité d'un bras de levier de 0 m. 35.
Fer rond du Périgord. . .	2,81	0,0145	15,4
Id.	3,17	0,0197	6,1
Fer rond ang. marq. Duvlous.	2,40	0,0198	4,1
Fer rond de l'Arriège. . .	3,57	0,0215	4,8
Id.	2,89	0,0215	4,5
Fer rond du Périgord. . .	3,19	0,0221	3,52
Id.	2,89	0,0230	3,1
Fer rond anglais.	3,24	0,0235	2,54
Fer rond du Périgord. . .	2,94	0,0265	1,52
Id.	3,35	0,0267	1,17
Id.	2,92	0,0257	0,825
Fer rond de l'Arriège. . .	2,77	0,0258	1,65
		Cités.	
Fer carré anglais marqué c 2.	4,12	0,0200	6,5
Id.	2,52	0,0200	4,1
Fer carré du Périgord. . .	2,52	0,0201	3,08
Id.	3,39	0,0226	0,62
Fer plat anglais.	2,91	0,0210	1,14
Id.	1,55	0,0240	5,62
		0,0086	
Fer plat du Périgord. . .	2,91	0,0240	7,2
		0,0105	
Fer plat anglais marqué a. .	1,45	0,0278	0,85
		0,0147	

Tableau de la résistance que divers métaux opposent à la rupture, par torsion, d'après M. RENNIE.

INDICATION des corps soumis à la torsion.	Longueur des pièces.		Equarri- sage	Poids produisant la rupture au moyen d'un levier de 2 pieds angl. ou de 0 m. 6096	
	en pouces angl.	en mètres.		en livres avoir.	en kilogr.
Fer coulé horizontalment.	0	0,1	1/4	0,006	9 15
Fer coulé verticalement.	0	0,1	1/2	0,006	10 10
Fer coulé horizontalment.	1/2	0,042	1/2	0,006	7 5
Id.	3/4	0,018	1/4	0,006	8 9
Id.	1	0,025	1/4	0,006	8 8
Fer coulé verticalement.	1/2	0,012	1/2	0,006	10 1
Id.	3/4	0,018	1/4	0,006	8 9
Id.	1	0,025	1/4	0,006	8 5
Id.	6	0,150	1/4	0,006	9 17
Fer coulé horizontalment.	0	0,1	1/2	0,012	93 12
Id.	0	0,1	3/2	0,012	70 00
Id.	10	0,254	1/2	0,012	52 00
Acier.	0	0,1	1/4	0,006	17 1
Fer forgé d'Angleterre.	0	0,1	1/2	0,006	10 2
Fer forgé de Suède. . . .	0	0,1	1/2	0,006	9 8
Métal de canon dur. . . .	0	0,1	1/2	0,006	5 0
Fente jeune élan.	0	0,1	1/4	0,006	4 11
Cuivre coulé.	0	0,1	1/4	0,016	4 5
Étain.	0	0,1	1/4	0,006	4 7
Plomb.	0	0,1	1/4	0,006	1 0

Les extrémités de chaque pièce étaient engrenées dans des matrices carrées très exactes. La longueur de la pièce est la longueur comprise entre les matrices.

Tableau de la résistance que le fer rond oppose à la rupture, d'après M. DUKEU.

Longueur des pièces.		Diamètre.		Poids produisant la rupture en appuyant le bras du levier de 1 mètre.	Poids produisant la rupture en appuyant le bras du levier de 1 mètre.
Pouces anglais.	Pouces français.	Pouces angl.	Pouces français.	Exprime en livres avoir du poids.	Exprime en kilo- grammes.
1,750	0,0408	2,1	0,0508	250	1067,5
3,500	0,0825	2,25	0,0573	585	2653,7
5,250	0,0962	2,50	0,0635	408	1791,2
7,000	0,0982	2,75	0,0698	700	3136,5
8,750	0,1016	3,00	0,0725	1170	5336,5
10,500	0,1129	3,50	0,0809	1210	5543,6
12,250	0,1179	3,75	0,0932	1667	7786,1
14,000	0,1170	4,00	0,1066	1938	8800,0
15,750	0,1224	4,25	0,1079	2158	9672,5

LIVRE SEPTIÈME.

ACOUSTIQUE.

470. L'acoustique a pour objet de déterminer les lois suivant lesquelles le son se produit dans les corps et se transmet ensuite jusqu'à nos organes. Cette science est du ressort de la physique, parce que les corps, tandis qu'ils retentissent, et qu'ils produisent du bruit ou du son, éprouvent dans leur masse des modifications remarquables, tout-à-fait dépendantes des forces physiques qui les constituent. Nous verrons qu'ils sont alors ébranlés dans toutes leurs parties, et que les molécules qui les composent exécutent des oscillations ou des mouvements de vibrations si rapides, qu'il est impossible d'en compter le nombre par des observations directes. L'étendue et la durée de ces mouvements, la direction suivant laquelle ils se propagent, et l'harmonie qui doit exister entre eux, pour qu'ils se soutiennent et se perpétuent sans se détruire, sont les phénomènes les plus frappants qui se présentent aux physiciens pour étudier l'arrangement moléculaire des corps, leur élasticité et toutes les circonstances de leur structure intérieure.

Pour prendre une première idée du nombre et de la variété des phénomènes que l'acoustique embrasse, il suffit de remarquer que tous les sons que nous pouvons entendre, que toutes les nuan-

ces que notre organe peut saisir entre eux, correspondent certainement à des modifications physiques différentes dans l'air qui nous apporte ces impressions, et dans le corps sonore, plus ou moins éloigné, auquel l'air les a reçues. C'est la série de ces mouvements divers, communiqués de proche en proche depuis le corps sonore jusqu'à nous, qu'il s'agit de développer. Ainsi l'acoustique prend le son à sa naissance; elle constate, pour ainsi dire, le mouvement de toutes les molécules du corps qui le produit, elle montre comment il se communique à l'air, comment il en traverse la masse, et comment il vient enfin ébranler les membranes extérieures de notre organe; là, la science est à son terme; dès que le nerf acoustique est frappé, il n'y a plus de traces perceptibles de modifications matérielles, et, par conséquent, plus de phénomènes physiques.

Ces notions générales font assez voir en quoi l'acoustique diffère de la musique : la première de ces sciences considère le son hors de nous et des sensations qu'il peut produire; la seconde le considère en nous, dans les émotions qu'il peut faire naître, dans les sentiments ou dans les passions qu'il peut exciter ou modifier.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA PRODUCTION DU SON ET DE SA TRANSMISSION DANS L'AIR ATMOSPHÉRIQUE.

471. *Le son est un mouvement particulier excité dans la matière pondérable.*

Si l'on écoute un son et qu'en même temps on observe la cause qui le produit, on remarque que la cause a cessé d'agir avant que le son soit parvenu jusqu'à notre organe : ainsi, dans l'explosion d'une arme à feu, on voit la lumière avant d'entendre le coup, pourvu qu'on soit placé seulement à la distance de quarante ou cinquante pas ; à une moindre distance, la lumière et le coup semblent frapper en même temps l'œil et l'oreille ; et, à me-

sure que la distance augmente, le temps qui s'écoule entre l'apparition de la lumière et la perception du bruit devient de plus en plus sensible. Il en est de même de l'explosion de la foudre : l'éclair brille avant que le coup de tonnerre se fasse entendre, et le temps qui s'écoule entre ces deux phénomènes peut donner une mesure de la hauteur ou plutôt de la distance à laquelle la foudre éclate. Les chocs ou les bruits quelconques, dont on peut saisir l'instant, donnent lieu à la même observation. D'après cela, on peut juger que plu-

sieurs observateurs, placés sur une même ligne à cent pas les uns des autres, n'entendraient pas au même instant le bruit qui serait existé à l'une des extrémités de cette ligne aux pieds du premier observateur : celui-ci entendrait le son avant tous les autres, le 2^e l'entendrait avant le 3^e, le 3^e avant le 4^e, etc., et ce qu'il importe de remarquer aussi, c'est qu'au moment où le 3^e observateur, par exemple, entendrait le son, le 1^{er} et le 2^e ne l'entendraient *plus*, tandis que le 4^e et les suivants l'entendraient *pas encore*; on peut donc conclure de cette expérience, qu'un son brusque et instantané, comme celui qui résulte d'un choc ou d'une explosion, *passé* successivement d'un lieu à l'autre; qu'il n'est jamais entendu que dans un lieu à la fois, et que, par conséquent, il est un mouvement particulier dont notre organe est affecté.

Mais, dans quelle substance ce mouvement peut-il se propager avec tant de rapidité? est-ce dans l'air lui-même ou dans quelque autre fluide plus subtil et plus élastique, tel, par exemple, que le fluide qui propage la chaleur et la lumière? Cette question, fort difficile en apparence, peut être résolue d'une manière décisive par l'expérience suivante :

Au milieu de la platine de la machine pneumatique, *fig.* 471, on dispose un petit coussinet de laine ou de coton, sur lequel on place un mouvement d'horlogerie à détente; muni d'un timbre; cet appareil étant convert d'une cloche à tige et à boîte à air, on fait le vide aussi exactement qu'il est possible, puis on tourne la tige pour presser la détente et lâcher le ressort. A l'instant l'horloge marche, le marteau frappe le timbre par intervalle, et aucun bruit ne se fait entendre au dehors. Mais, si l'on rend un peu d'air, on commence à distinguer un petit bruit très aigu, correspondant à chaque coup du marteau; un peu plus d'air donne à ce bruit un peu plus de force; enfin, quand l'air est tout-à-fait rentré, le son est fort et se fait entendre au loin. Donc le son ne peut pas se propager dans le vide; là où il n'y a plus de matière pondérable il n'y a plus de véhicule du son.

Ainsi le son diminue d'intensité, par une double cause, à mesure qu'il s'élève dans l'atmosphère : il diminue parce que la distance augmente, et parce que l'air dans lequel il pénètre est de plus en plus raréfié. Les bruits les plus violents qui retentissent sur la terre ne peuvent pas sortir des limites de l'atmosphère, ils s'affaiblissent à mesure qu'ils en approchent et s'éteignent sans pouvoir les franchir. Réciproquement, nul bruit ne peut venir des espaces célestes jusqu'à la terre; les plus terribles explosions pourraient éclater sur le globe de la lune, sans qu'il nous soit donné d'en entendre le moindre retentissement.

Il suffit déjà des bouleurs, toujours petites, que les hommes ont pu atteindre, en gravissant les montagnes ou en s'élevant en ballon, pour produire un grand affaiblissement dans l'intensité du

son. De Sausure dit qu'au sommet du Mont-Blanc, un coup de pistolet fait moins de bruit qu'un petit pétard tiré dans la plaine, et M. Gay-Lussac a constaté que l'intensité de sa voix était très affaiblie lorsqu'il essayait de former des sons à 7,000 mètres de hauteur, suspendu dans son ballon, loin des nuages et de tous les corps solides.

L'air n'est pas le seul corps qui puisse transmettre les sons, tous les fluides élastiques jouissent de cette propriété; on s'en assure aisément en faisant résonner le timbre de l'expérience précédente dans des cloches remplies de différents gaz ou de différentes vapeurs. Pour ces derniers fluides, les expériences peuvent se faire encore d'une manière plus commode en suspendant au centre d'un grand ballon (*Fig.* 470) une petite sonnette avec des fils de chanvre non tordus. Quand le vide est fait, la sonnette ne peut plus se faire entendre; alors on fait passer dans le ballon quelques gouttes d'un liquide volatil, tel que l'éther, la vapeur se forme à l'instant et le bruit se transmet au dehors.

L'eau transmet très bien le son; les plongeurs peuvent entendre ce que l'on dit sur le rivage, et du rivage on entend le bruit des cailloux qui sont heurtés sous l'eau à de grandes profondeurs.

Enfin les corps solides peuvent non-seulement produire le son, mais ils peuvent aussi le transmettre dans toute l'étendue de leur matière; quand le timbre est sous la cloche, il faut bien que le son traverse toute l'épaisseur des parois pour se faire entendre au dehors. Un grand nombre d'expériences analogues démontrent cette vérité; nous nous bornerons à indiquer ici le phénomène curieux que l'on observe dans les longues pièces de bois. Si un observateur approche l'oreille de l'une des extrémités d'une poutre de sapin il de 20 à 25 mètres de longueur, il entendra le bruit que l'on pourra faire à l'autre extrémité en y passant légèrement des barbes de plume contre le bout des fibres, et cependant ce bruit est si faible dans l'air qu'il est à peine entendu par ceux qui le produisent. Un moindre frémissement peut encore se transmettre de la même manière, car il suffit de parler très bas, mais directement contre l'extrémité des fibres, pour que le bruit parcoure rapidement toute la longueur de la poutre et affecte l'organe qui écoute à l'autre extrémité; cette longue masse solide fait en quelque sorte l'office de porte-voix.

Après avoir montré que le son est un mouvement, qu'il est produit dans la matière pondérable, et qu'il peut se propager dans tous les corps, il faut essayer de reconnaître quelle est la nature de ce mouvement.

472. *Le mouvement qui produit le son est toujours un mouvement de vibration.* — La plupart des corps sonores accomplissent des oscillations sensibles pendant tout le temps qu'ils rendent des sons. Ce phénomène est surtout frappant dans les cordes de violon, de harpe, de guitare et des autres instruments de cette espèce; les oscillations, il est vrai,

sont trop rapides pour que l'esprit puisse les compter; mais l'œil les aperçoit, il saisit les limites des excursions de la corde, et il croit la voir eu même temps, dans toutes les positions intermédiaires, à peu près comme il voit un cercle de feu lorsqu'un charbon enflammé est tourné en rond avec une vitesse suffisante. *cc'* (Fig. 474), étant, par exemple, la position primitive de la corde, et *c* la position qu'on lui donne en l'écartant avec le doigt ou autrement, dès qu'on l'abandonne, elle vient en *c* l' *c'*, retourne en *c* l' *c'* et accomplit ainsi quelques milliers d'oscillations qui diminuent peu à peu d'amplitude et qui finissent par s'éteindre d'elles-mêmes après quelques instans. Le son cesse avec le mouvement, et recommence avec lui. Ce sont ces oscillations ou ces mouvemens de va et vient que l'on a coutume d'appeler acoustique des vibrations.

Dans les timbres ou les cloches, ces vibrations sont moins apparentes; mais elles existent comme dans les cordes; pour s'en assurer, on prend une grande cloche de verre dans laquelle on suspend une petite balle de métal; on la frappe pour lui faire rendre un son, et ensuite on l'incline pour que la balle vienne en toucher la paroi (Fig. 469); alors la balle saute d'un mouvement rapide, et l'on entend les chocs répétés qu'elle produit, en retombant, par son poids.

Enfin, il suffit de poser le doigt légèrement sur un corps sonore quelconque, pour sentir, dans toutes les parties de ce corps, un frémissement qui accompagne toujours la production du son; mais si en un seul point l'on exerce une pression un peu forte, le mouvement est arrêté dans toute la masse et le son est éteint.

Il y a des instrumens, tels que la flûte et le sifflet, qui semblent faire exception au principe général que nous avons énoncé, car rien dans ces corps sonores ne paraît être en vibration; mais nous verrons bientôt que, si la matière solide de ces instrumens ne vibre pas ou ne vibre que d'une manière insensible, il y a cependant une matière vibrante, et cette matière est la masse d'air qu'ils contiennent. Ainsi, le principe est vrai dans toute sa généralité, lorsqu'on l'applique seulement au corps sonore lui-même, et nous allons essayer de faire voir qu'il est également vrai lorsqu'on l'applique à l'air ou au milieu quelconque qui enveloppe le corps sonore et qui doit recevoir le son pour le transmettre à des distances indéfinies.

473. *Chaque vibration du corps sonore excite dans l'air une ondulation d'une longueur déterminée.*

Cette proposition est une des plus importantes et des plus difficiles de l'acoustique; mais nous devons l'aborder dès à présent, et mettre d'autant plus de soin à la faire comprendre, qu'elle nous servira comme de point de départ pour exposer les théories de l'optique.

Concevons un tube horizontal *rr'* (Fig. 472),

ayant, par exemple, 10,000 pieds de longueur et 1 pied de diamètre; l'air qui le remplit est partout à la même température et sous la même pression; un piston *rr'*, joignant bien contre les parois, peut, en 1" de temps, accomplir une oscillation entre les deux positions *r* et *s* qui sont à 1 pied de distance. Rien n'est établi d'avance sur les vitesses croissantes et décroissantes qu'il pourra prendre dans cet intervalle.

Tout étant en repos, le piston part de *r* pour arriver en *s*; pendant ce mouvement, l'air du tuyau se modifie d'une certaine manière, et, pour mieux étudier les modifications qu'il éprouve, nous saisissons l'instant précis où le piston arrive en *s*, et nous supposons que toutes les molécules d'air *restent* comme elles se trouvent alors, ou pour mieux dire, nous supposons que celles qui sont comprimées ne puissent pas se débander, que celles qui sont dilatées ne puissent pas se rapprocher, et que celles qui sont en repos conservent leur état de repos.

Si la colonne d'air se comportait comme un corps solide parfaitement dur, il est clair que l'une de ses extrémités étant poussée par le piston, l'autre extrémité sortirait du tuyau au même instant et de la même quantité; mais il n'y a point de corps parfaitement dur; l'air est très fluide et très compressible; et quand le piston pousse devant lui l'une des extrémités de la colonne, l'autre extrémité ne peut pas obéir au même instant; il faut du temps pour que l'impression se transmette jusqu'à elle; et, d'après la longueur que nous avons donnée au tuyau, nous pouvons bien affirmer qu'aucune molécule d'air n'est sortie par l'extrémité ouverte *r'* pendant que le piston est passé de *rr'* en *ss'*. Donc, l'air est comprimé dans le tuyau à droite du piston, puisqu'il occupe 1 pied de longueur de moins qu'il n'occupait tout à l'heure. De plus, il est évident qu'il n'est pas comprimé également dans toute l'étendue du tuyau; car, pendant la durée de 1" que le piston a dû mettre pour venir de *rr'* en *ss'*, la compression n'a pu se communiquer et se faire sentir qu'à une certaine distance, telle que *a a'*, par exemple. Cette partie de la colonne d'air, qui a pu être modifiée pendant le mouvement du piston, est ce que l'on appelle une onde ou une ondulation, et la longueur de l'onde est la distance de ses deux extrémités *ss'* et *aa'*.

Examinons maintenant comment l'air est modifié dans les différentes parties de l'onde; et, pour cela, concevons des plans parallèles au piston, qui partagent la colonne d'air en petites tranches, telles que *a b e d*, *c d e f*, etc., ayant toutes la même épaisseur; il est probable que dans chaque tranche toutes les molécules d'air, depuis l'axe jusqu'au contour du tuyau, éprouvent les mêmes modifications, car tout est pareil pour chacune d'elles. Ainsi, pour savoir ce qui est arrivé à toute la masse d'air qui compose l'onde, il suffit de connaître ce qui est arrivé à une molécule de chaque

tranche. Or, puisque l'air qui était compris depuis r' en a a' a été comprimé dans sa totalité et réduit à n'occuper que l'espace s s' a' , il faut bien que dans chaque tranche les molécules aient éprouvé deux effets : 1^o qu'elles aient été comprimées, 2^o qu'elles aient reçu une certaine vitesse *impulsive*, c'est-à-dire, qui les éloigne du centre d'ébranlement ou du piston qui les a poussées.

Il est évident que, dans toute la longueur de l'onde, les différentes tranches ne peuvent être au même état : la dernière tranche, par exemple, celle qui touche a a' , n'a pu recevoir qu'une très petite vitesse et une compression très petite, puisque le mouvement ne fait que d'y arriver ; la première tranche, celle qui touche s s' , est déjà revenue au repos, puisque nous considérons les phénomènes à l'instant où le piston s'arrête ; et comme elle n'a plus de vitesse, elle n'a pareillement plus de compression ; elle a déjà communiqué tout ce qu'elle avait. Au contraire, les tranches qui sont vers le milieu de l'onde ont en même temps la plus forte compression et la plus grande vitesse. Il y a donc un certain ordre dans les diverses modifications des différentes tranches, tant pour la vitesse des molécules d'air, que pour leur compression. Cet ordre dépend de l'ordre des vitesses croissantes et décroissantes par lesquelles le piston a dû passer en se transportant de r r' en s s' .

Où peut représenter, par une figure qui parle aux yeux, tous les mouvements qui caractérisent une onde depuis son origine jusqu'à sa fin ; pour cela, il suffit d'élever sur la ligne s a , qui en marque la longueur, des perpendiculaires dont les hauteurs représentent le degré de compression des tranches correspondantes ; les extrémités de ces perpendiculaires formeront une ligne dont la courbure ou les sinuosités représenteront fidèlement l'ordre dans lequel se succèdent les compressions des tranches successives. En s , la hauteur de la perpendiculaire sera nulle puisque la compression est nulle ; il en sera de même en a ; en x la hauteur de la perpendiculaire sera, par exemple, x x' , en r elle sera r r' , en m elle sera m m' , etc., en sorte que la courbe des compressions s m' a pourrait être une demi-circonférence de cercle. Mais on conçoit que, sur cette longueur s a , on peut tracer une foule de courbes continues passant par les points s et a , comme on le voit en s s a , s s' a , et même, l'une de ces courbes étant donnée, on peut toujours attribuer au piston, dans son passage de r r' en s s' , un mouvement tel qu'il excite une onde dont les compressions successives soient représentées par cette courbe. Quand il y a plusieurs sinuosités dans la courbe des compressions comme en a p q r a , on dit que l'onde correspondante est une *onde dentelée*.

Après avoir fait l'analyse des diverses modifications que le piston peut imprimer à la colonne d'air en passant de r r' en s s' dans l'intervalle de l'onde,

essayons de voir ce qui arrivera dans les instants suivants, le piston restant toujours arrêté en s s' . L'air momentanément comprimé depuis s s' en a a' , ne peut pas rester dans cet état ; car, le tuyau étant ouvert en r' , il faut qu'après un certain temps, l'air excédant soit sorti, et que toute la colonne soit revenue au repos. Or, on démontre, en mécanique, que la compression et la vitesse se communiquent de proche en proche de la manière suivante : dans le 1^{er} instant de la 2^e seconde, la vitesse passe à droite de a a' , envahit une première tranche, et en même temps la tranche qui touche le piston tombe au repos ; dans le 2^e instant une deuxième tranche à droite de a a' est envahie, et une deuxième tranche en avant du piston tombe au repos ; dans le 3^e instant, le mouvement gagne la 3^e tranche en avant de a a' , et le repos gagne la 3^e tranche en avant du piston, etc. ; de telle sorte, qu'à la fin de la 2^e seconde l'air est en repos depuis s en a , et il est agité depuis a en s ; la longueur a s est égale à s a , et de plus, les compressions et les vitesses depuis a en s sont exactement ce qu'elles étaient depuis s en a . Ainsi, l'ondulation s'avance et se transporte, en quelque sorte, tout d'une pièce en conservant sa longueur et tous ses caractères ; à la fin de la 3^e seconde elle serait en s c ; à la fin de la 4^e, en c d , etc.

L'onde que nous venons de décrire, dans laquelle toutes les tranches sont comprimées et toutes les vitesses impulsives, s'appelle *onde condensée* ou quelquefois *onde condensante*.

Mais il est facile de voir que des phénomènes inverses se sont développés à gauche du piston r r' pendant qu'il s'est transporté en s s' . En effet, un espace plus grand a été offert à la colonne d'air, la 1^{re} tranche s'est précipitée à la suite du piston en se rarifiant, la 2^e tranche s'est précipitée pour envahir la 1^{re} et prendre sa place, etc., etc. ; et après la 1^{re} seconde, quand le piston s'arrête en s s' , la raréfaction s'est fait sentir jusqu'en a . L'onde qui en résulte s'appelle *onde rarifiée*, ou bien *onde rarifiante* ; sa longueur est exactement la même que celle de l'onde condensée et se produit devant le piston ; les raréfactions sont nulles en s s' et en a a' , et, dans toutes les tranches, les vitesses sont *apulsives*, c'est-à-dire dirigées vers le centre de l'ébranlement.

Cette onde rarifiée se propage aussi, de proche en proche, dans toute l'étendue de la colonne d'air, en conservant partout la même longueur et la même succession de vitesses et de raréfactions.

Ces considérations nous laissent entrevoir, dès à présent, les principes sur lesquels repose le phénomène de l'audition ; car, si nous imaginons dans quelques points du tuyau une tranche quelconque m m' , fig. 472, nous pouvons remarquer qu'elle éprouve successivement toutes les modifications qui constituent l'onde s a , puisqu'elle devient, tour à tour, la 1^{re}, la 2^e, la 3^e..., et la dernière

tranche de cette onde. Et, si dans cette tranche nous imaginons une petite membrane *mue*, très délicate et très élastique, il est évident qu'elle devra recevoir dans leur ordre toutes les impulsions qui sont successivement données aux molécules d'air; or, c'est là précisément ce qui arrive à la *membrane du tympan* qui termine le conduit, dont le pavillon de l'oreille est l'épanouissement. On conçoit donc que cette membrane, dont la mobilité égale celle de l'air, puisse recevoir et compter en quelque sorte toutes les modifications des différentes tranches de l'onde sonore.

Si le piston après s'être arrêté en *s*, pendant un instant imperceptible, revient dans sa position primitive *r r'* en repassant par les mêmes vitesses, on voit qu'il excitera derrière lui, à droite de *s*, une onde raréfiée toute pareille à celle qu'il avait excitée à gauche pendant son *allée*, et que cette onde se mettra à la suite de la première onde condensée, de telle sorte qu'à la fin de la 2^e seconde, l'onde condensée sera entre *a* et *s*, et l'onde raréfiée entre *s* et *s*. De l'autre côté, au contraire, l'onde raréfiée sera de *n* en *b*, et l'onde condensée de *a* en *s*, puis une autre *allée* et une autre *venue* du piston exciteront encore des ondes semblables, et semblablement disposées, qui courront après les premières, et ainsi de suite. Alors une oreille qui serait placée quelque part dans le tuyau n'entendrait plus un son passant comme le bruit d'une explosion, mais un son continu plus ou moins grave, plus ou moins fort et d'un timbre plus ou moins agréable. Entre le son de droite et celui de gauche, il n'y aura que cette seule différence, que dans l'un c'est l'onde condensée qui marche la première, et dans l'autre c'est l'onde raréfiée.

474. *De la gravité et de l'acuité des sons.* — La différence qui existe entre les sons graves et les sons aigus est si frappante pour nos organes, qu'elle doit certainement correspondre à quelque modification physique bien caractérisée dans l'air qui porte ces sons. Nous démontrerons plus tard, par des observations directes, que le son le plus grave que nous puissions entendre a une longueur d'onde de 32 pieds, et que le son musical le plus aigu n'a qu'une longueur de 18 lignes environ. Entre ces deux limites, sont compris tous les sons et toutes les nuances que l'oreille humaine puisse distinguer, et deux ondes de même longueur donnent toujours l'unisson parfait, quelle que soit d'ailleurs l'intensité ou le timbre des sons qu'elles portent. Les ondes plus longues que 32 pieds et celles qui sont plus courtes que 18 lignes, viennent sans doute à leur manière frapper aussi la membrane du tympan; mais il n'en résulte aucune sensation distincte; l'organe reste sourd pour ces sons-là. Le rapport de gravité et d'acuité de deux sons est ce qu'on appelle le *ton*.

475. *L'intensité du son* on peut pas dépendre de la longueur des ondes, elle dépend seulement des compressions plus ou moins fortes ou des vitesses

plus ou moins grandes que l'air a reçues du corps sonore et qui se transmettent de couche en couche jusqu'à notre organe. Une corde de basse peut être à l'unisson avec le bruit déchirant du tam-tam; c'est-à-dire que les ondes sent de même longueur, mais l'air frappé par le tam-tam accomplit des vibrations dont l'amplitude est beaucoup plus grande; c'est là ce qui fait son intensité assourdissante.

476. Le *timbre* des sons est bien plus difficile à caractériser que le ton et l'intensité; les physiiciens ne sont pas complètement d'accord sur ce point, mais il paraît bien probable que le timbre dépend de l'ordre dans lequel se succèdent les vitesses et les changements de densité dans les différentes tranches d'air qui sont comprises entre les deux extrémités de l'onde. On a même supposé que les *sons articulés* par une voix différent des sons inarticulés, en ce que les ondes sent teigneurs dentelles pour les premiers et ne le sent jamais pour les seconds.

477. *Tous les sons, quel que soit leur ton, leur timbre ou leur intensité, se propagent dans l'air avec la même vitesse.* — Lorsque plusieurs observateurs écoutent un concert à diverses distances, ils entendent tous la même mesure et la même harmonie. Ainsi, en se propageant au loin, tous les sons se succèdent dans le même ordre et aux mêmes intervalles; ce qui suppose nécessairement qu'ils marchent avec la même vitesse; car, si les sons graves, par exemple, prenaient l'avance sur les sons aigus, la mesure serait bientôt rompue, et ce qui serait une harmonie à 10 pas serait à 100 pas une insupportable cacophonie.

478. *La vitesse du son dans l'air est de 340 mètres par seconde à 16°.* — On a fait de nombreuses expériences en différents lieux de la terre, pour déterminer avec exactitude la vitesse du son. On peut citer particulièrement en France, celles du P. Merseuses, celles de Cassini et Buighens, celles des académiciens en 1738, et celles du Bureau des Longitudes en 1822; en Angleterre, celles de Walker en 1698, celles de Flannister et Halley, et celles de Derham en 1704; en Italie, celles de l'Académie del Cimento en 1660, et celles de Bianconi, en 1440; en Allemagne, celles de Mayer en 1778; celles de Müller en 1791, et celles de Benzenberg en 1809; dans les Pays-Bas, celles de Noll et Vanbeek en 1823; enfin en Amérique, celles de La Condamine en 1740 et celles d'Espinoza de Bauza en 1794. Ces expériences offrent dans leurs résultats des différences assez considérables. Nous nous bornerons à exposer seulement celles qui ont été faites, près de Paris en 1822, par le Bureau des Longitudes, sur la proposition de M. Delaplace.

Les deux stations que l'en avait choisies étaient Villejuif et Montléry. A Villejuif, le capitaine Boscary fit disposer, sur un point élevé, une pièce de six avec des gargousses de deux et de trois livres de poudre. Les observateurs placés autour de la pièce, étaient MM. de Prony, Arago et Mathieu.

A Montlbery, le capitaine Pernetty fit disposer une pièce de même calibre, avec des gargousses de même poids; les observateurs étaient MM. de Humboldt, Gay-Lussac et Bouvard. Les expériences furent faites de nuit et commencèrent à 11 h. du soir le 21 et le 22 juin 1822. De Villejuif, l'on apercevait très distinctement le feu de l'explosion de Montlbery et *vice-versa*; le ciel était serein et l'air à peu près calme.

Les chronomètres étant bien réglés, il avait été convenu que chaque station tirerait 12 coups à 10' les uns des autres, et que la station de Montlbery commencerait 6' avant celle de Villejuif; de telle sorte qu'un observateur qui aurait été placé juste au milieu de la ligne des deux canons aurait entendu de 6' en 6' des coups croisés ou *réci-proques*, le 1^{er} venant de Montlbery, le 2^e de Villejuif, le 3^e de Montlbery, etc. Ces coups réci-proques étaient le seul moyen de découvrir l'influence du vent sur la vitesse du son, ou plus généralement de découvrir si au milieu des variations sans nombre qui modifient l'atmosphère à chaque instant, la son emploie le même temps pour parcourir le même espace dans les deux directions opposées.

Les observateurs de Villejuif entendirent parfaitement tous les coups de Montlbery; chacun d'eux notait sur son chronomètre le temps qui s'écoulait entre l'apparition de la lumière et l'arrivée du son; la plus grande différence que l'on trouve entre les trois résultats correspondans à une observation ne s'élève pas à plus de 3 ou 4 dixièmes de seconde,

et entre les douze observations la différence des moyennes ne dépasse pas 3 dixièmes de seconde; le temps le plus long est 55'', le plus court 54'',7 et le temps moyen de 54'',81.

A Montlbery, on ne put entendre que sept des douze coups tirés à Villejuif; et même sur ces sept coups il n'y en eut pas un seul qui fût entendu par les trois observateurs à la fois. Cependant les résultats sont assez concordans: le temps le plus long est 54'',9, le plus court 53'',9 et le temps moyen de 54'',43.

Ainsi on peut prendre 54'',6 pour le temps moyen que le son mettrait à passer d'une station à l'autre.

Restait à mesurer exactement l'intervalle des deux stations; M. Arago fut chargé de ce soin, et en s'appuyant sur la triangulation de la méridienne, il trouva que les deux canons étaient à une distance de 9549,6 toises.

En divisant cette longueur par 54'',6, durée moyenne de propagation, l'on trouve 174,9 toises ou 340^m,88, pour l'espace que le son a parcouru en 1'' dans la nuit du 21 juin 1822; la température était de 16° centigrades; le baromètre marquait à Villejuif 756^{mm},5, et l'hygromètre de Saussure 78°.

Ainsi la vitesse du son est de 340^m,88 à la température de 16°.

En réduisant, par le calcul que nous verrons plus loin, cette vitesse à ce qu'elle serait pour 10°, on trouve 337^m,28, et pour la température 0 on trouve 331^m,12.

CHAPITRE II.

ÉVALUATION NUMÉRIQUE DES SONS PAR LES VIBRATIONS DES CORDES, DES TUBES CYLINDRIQUES, DES LAMES ET DE LA SIRÈNE.

479. *Lois générales des vibrations des cordes et des sons harmoniques qu'elles produisent.*

Lorsqu'on pince une corde tendue sur un instrument quelconque, comme une harpe ou une guitare, les vibrations qu'elle accomplit sont beaucoup trop rapides pour que l'on puisse en compter le nombre absolu; cependant l'on peut alors distinguer assez nettement deux phénomènes remarquables: premièrement le son *monte* et devient plus aigu dès qu'on raccourcit la corde ou qu'on lui donne une plus forte tension, et secondement le nombre des vibrations augmente d'une manière sensible. Ainsi, il y a certainement une dépendance entre le son de la corde, sa longueur, sa tension et la rapidité de ses vibrations; mais cette dépendance, si facile à constater par l'expérience, ne peut être déterminée que par le secours du calcul; elle

constitue ce que l'on appelle en mécanique le *problème des cordes vibrantes*, problème qui fut résolu en premier lieu par Taylor (*Methodus incrementorum*, etc., 1716), et qui eut beaucoup de célébrité, parce qu'il excita pendant près d'un demi-siècle de vives discussions entre les plus grands géomètres. Jean Bernouilli, D'Alembert, Euler et Daniel Bernouilli, avaient beaucoup écrit sur ce sujet, quand Lagrange, en 1759, presque à son début dans la carrière des sciences, eut la gloire de lever toutes les difficultés et de mettre un terme à la discussion.

Voici les résultats auxquels on arrive par le calcul, et qui expriment les lois des vibrations des cordes:

1°. Les nombres de vibrations d'une corde sont en raison *inverse* de sa longueur, c'est-à-dire, que si

une corde sonore quelconque est tendue sur un instrument, comme le violon, la basse, la guitare, etc., et qu'elle fasse dans un certain temps un nombre de vibrations représenté par 1, lorsqu'elle vibre à vide ou dans toute sa longueur, elle fera dans le même temps des nombres de vibrations représentés par 2, 3, 4, etc., lorsque, *sans changer sa tension*, l'on fera vibrer seulement $1/2$, $1/3$, $1/4$, etc., de sa longueur; elle ferait des nombres de vibrations représentés par $3/2$, $4/3$, $5/4$, etc., si l'on faisait vibrer seulement $2/3$, $3/4$, $4/5$, etc., de sa longueur. Pour limiter ainsi la partie vibrante, il suffit de promener un petit chevalet sur lequel on presse légèrement la corde avec le doigt.

2°. *Les nombres de vibrations d'une corde sont proportionnels aux racines carrées des poids qui la tendent*; c'est-à-dire, que si l'on représente par 1 le nombre des vibrations d'une corde qui est tendue par un poids 1, ce nombre de vibrations dans le même temps deviendra 2, 3, 4, etc., quand, *sans changer sa longueur*, on la tendra par des poids 4, 9, 16, etc.

3°. *Les nombres de vibrations des cordes de même matière sont en raison inverse de leur épaisseur ou de leur diamètre*, c'est-à-dire, que si l'on prend, par exemple, deux cordes de cuivre ou deux cordes d'acier comme celles d'un piano, dont l'une ait un diamètre double de l'autre, qu'on les tende par un même poids et qu'en on fasse vibrer des longueurs égales, la plus mince fera dans le même temps deux fois plus de vibrations que la plus grosse. Il est probable que deux cordes à boyau ne suivraient pas exactement cette loi, parce qu'on n'est jamais sûr qu'elles soient absolument de même matière.

4°. *Les nombres de vibrations des cordes de matières différentes sont en raison inverse des racines carrées de leurs densités*; c'est-à-dire, que si l'on prend, par exemple, une corde de cuivre dont la densité est presque 9, et une corde à boyau dont la densité est à peu près 1, qu'elles aient le même diamètre, qu'on les tende par des poids égaux et qu'on en fasse vibrer des longueurs égales, le nombre des vibrations de la corde de cuivre sera trois fois moindre que le nombre des vibrations de la corde à boyau. Il est évident que les lois précédentes ne peuvent s'appliquer qu'à des cordes homogènes dans leur longueur et dans leur épaisseur, et que, par exemple, elles ne s'appliquent nullement aux cordes à boyau revêtues d'un fil de métal, dont on se sert pour la harpe et pour les des basses et des violons. Le métal enveloppant est ici une masse inerte qui doit être entraînée par l'élasticité de la corde et qui augmente par conséquent la durée des vibrations.

Ces principes une fois posés, il devient très facile de représenter les sons par des nombres. On se sert pour cela d'un instrument qui donne des sons purs et qui permette de mesurer avec exactitude les longueurs des cordes. Cet instrument s'appelle *anémètre* ou *monocorde*; on peut lui don-

ner différentes formes; nous supposons que l'on emploie celui qui est représenté dans la figure 473, il porte une corde à boyau et une corde de métal, pour montrer que sur l'une et sur l'autre les effets sont les mêmes. La corde est attachée à un crochet c, passe sur les chevalets fixes r et r', sur une poulie mobile n, et s'attache à un autre crochet c' auquel on suspend les poids p. Le chevalet mobile n ne peut glisser sous la corde sans la toucher, on l'arrête où l'on veut, et pour réduire la longueur de la corde il suffit de la presser avec le doigt sur l'arrête r de ce chevalet. Nous verrons plus tard que la caisse s' sert à renforcer le son. Supposons maintenant que la corde soit convenablement chargée pour rendre un son plein et pur en vibrant à vide, que l'on prenne ce son pour point de départ, ou pour l'ut, et qu'on avance peu à peu le chevalet pour obtenir successivement les autres notes de la gamme, *ré mi fa sol la si ut*, la longueur de la corde entière étant représentée par 1, on trouvera pour les autres notes les longueurs suivantes.

Noms des sons . . . ut ré mi fa sol la si ut.

Longueurs des cordes $1 \frac{8}{9} \frac{4}{3} 3 \frac{2}{3} 2 \frac{1}{2} 1$.

Mais les nombres de vibrations de la corde étant en raison inverse de sa longueur, on aura donc, en représentant par 1 le nombre des vibrations qui donnent l'ut :

Noms des sons . . . ut ré mi fa sol la si ut

Nombre des vibrations $1 \frac{9}{8} \frac{4}{3} 3 \frac{3}{2} \frac{2}{1} 2$.

On sait que l'intervalle de ut à ré s'appelle une *seconde*; de ut à mi une *tierce*; de ut à fa une *quarte*; de ut à sol une *quinte*; de ut à la une *sixième*; de ut à si une *septième*; de ut à ut une *octave*, etc. Ainsi quand deux sons forment l'octave le nombre des vibrations du plus aigu est double du nombre des vibrations du plus grave; pour la *tierce*, le plus grave fait 4 vibrations et le plus aigu 5; pour la *quarte*, le plus grave 3 et le plus aigu 4; pour la *quinte*, le plus grave 2 et le plus aigu 3, etc. Ces rapports sont invariables, l'oreille n'y tolère aucune altération, c'est-à-dire, qu'il faut pour que deux sons soient à l'octave que le nombre des vibrations du plus aigu divisé par le nombre des vibrations du plus grave donne 2; qu'il donne $3/2$ pour la *quinte*, etc. Ainsi le nombre des vibrations du ré est $9/8$, son *octave aiguë* sera $9/8 \times 2 = 9/4$, et son *octave grave* $9/8 : 2 = 9/16$, etc.; sa *tierce* sera $9/8 \times 5/4 = 45/32$; sa *quinte* $9/8 \times 3/2 = 27/16$, etc., réciproquement, le ré et le sol forment une *quarte*, parce que le rapport de sol à ré est $3/2 : 9/8 = 3/2 \times 8/9 = 4/3$ qui est le rapport de *quarte*; tandis que le ré et le la ne forment pas une *quinte*, parce que le rapport de la à ré est $5/3 : 9/8 = 5/3 \times 8/9 = 40/27$ qui n'est pas $3/2$ comme il est nécessaire pour la *quinte*, etc.

On peut d'après cela écrire facilement autant

d'octaves que l'on vaudra, au-dessus ou au-dessous de l'octave précédente; puisqu'il suffira de multiplier tous les nombres de celle-ci par 2, par $2^2 = 4$, par $2^3 = 8$, etc., pour avoir successivement la 1^{re}, la 2^e, la 3^e octave au-dessus, et de les multiplier par $1/2$, par $1/2^2 = 1/4$, par $1/2^3 = 1/8$, etc., pour avoir la première, la deuxième, la troisième octave au-dessous, etc.

Ces sons ne sont pas les seuls que l'on emploie dans la musique, on emploie aussi des *dièses* et des *bémols*. Mais il est facile de s'assurer au moyen du monocorde, par des expériences analogues aux précédentes, que *diésser* un son, c'est multiplier le nombre de ses vibrations par 23/24; et que le *bémoliser*, c'est le multiplier par 24/25. Ainsi tandis que l'*ut*, par exemple, fait 24 vibrations, l'*ut dièse* en fait 25 et tandis que le *si* fait 25 vibrations le *si bémol* n'en fait que 24.

Lorsque deux sons s'approchent tellement de l'unisson que l'un d'eux fait 80 vibrations tandis que l'autre en fait 81, en sorte que leur *intervalle* ou leur rapport soit 80/81, on dit qu'ils ne diffèrent que d'un *comma*. Les organes exercés sentent très bien cette différence.

Lorsqu'on fait résonner ensemble deux sons qui sont à l'octave, ou à la tierce, ou à la quinte, ils forment une *consonnance*, ou un *accord*; au contraire, la *seconde* ou la *septième* forment une *dissonnance*.

Les *sons harmoniques* sont ceux qui suivent la série des nombres naturels, 1, 2, 3, 4, 5, etc.; le 2^e est l'octave du 1^{er}; le 3^e en est la *deuxième*, ou la double quinte; le 4^e la *double octave*; le 5^e la *dix-septième* ou la triple tierce, etc.; ainsi ils ne forment jamais de dissonnance. C'est sans doute pour cette raison qu'on les appelle depuis long-temps sons harmoniques, mais un phénomène remarquable, est l'existence simultanée de tous ces sons dans les vibrations d'une seule corde. En effet, si l'on met en mouvement avec l'archet une corde de violon ou de violoncelle, on n'entend pas seulement le *son fondamental* de cette corde, celui qu'elle rend en vibrant dans toute sa longueur, mais on entend encore le son 3 ou sa *deuxième*, et le son 5 ou sa *dix-septième*; il y en a même qui prétendent déceler aussi le son 6 ou sa *dis-neuvième*. Ce phénomène trouve son explication dans l'expérience suivante que l'on doit à Sauveur. On place le chevalet mobile sous le milieu de la corde du monocorde, et avec le doigt on appuie *très légèrement* sur ce point, tandis que l'on passe l'archet *près du chevalet fixe* pour ébranler l'une des moitiés de la corde; cette moitié s'ébranle en effet, mais l'autre moitié entre aussi en vibration très visiblement; et si l'on veut s'en assurer il suffit de mettre en divers points près de son milieu de petits chevrons de papier qui seront lancés au loin. La figure que prend alors la corde est représentée dans la *fig. 475*. On peut ensuite placer le chevalet mobile à la fin du premier tiers de la corde, et

quand on ébranle ce premier tiers avec l'archet comme tout à l'heure, les deux autres tiers entrent à l'instant en vibration; mais ébranlé d'eux vibre séparément, autour du point *n* qui reste fixe quoique libre (*Fig. 476*). Pour s'en assurer on met encore de petits chevrons de papier, en *v*, en *n* et en *v'*. Ceux qui sont en *v* et *v'* sautillent d'abord et sont bientôt renversés, tandis que celui qui est en *n* reste immobile. Le point *n* s'appelle un *nœud*, et les points *v* et *v'* des *ventres*.

L'expérience réussit de même lorsqu'on place le chevalet à la fin du premier quart, du premier cinquième ou du premier sixième de la corde; il y a alors, 2, 3 ou 4 nœuds sur lesquels les chevrons restent immobiles, tandis qu'ils sautent vers le milieu de tous les ventres.

Sauveur s'appuie sur ces résultats curieux, pour conclure qu'une corde sonore ébranlée à vide ne vibre pas seulement dans toute sa longueur, mais que chacune de ses moitiés, chacun de ses tiers, chacun de ses quarts, de ses cinquièmes et de ses sixièmes, etc., vibre séparément et produit le son qui convient à sa longueur, et que telle est la cause de la formation des harmoniques; en effet: que le milieu *m* de la corde (*Fig. 477*) oscille de *h* en *h'*, quand la corde vibre en totalité, ce mouvement n'empêche pas que chaque moitié ne vibre autour de lui, comme s'il était en repos; il en est de même de tous les nœuds correspondants à chaque tiers, à chaque quart, etc.; et si *f m f'* (*Fig. 477*) représente par exemple une position de la corde entière pendant ses vibrations, il faut concevoir qu'elle est là partagée en une foule de parties vibrantes dont plusieurs sont indiquées sur la figure.

480. *Lois générales des vibrations des tuyaux cylindriques et du battement qui résulte de deux sons voisins.*

Les tuyaux sonores tels qu'ils entrent dans la composition des organes sont en général disposés comme un *sifflet* ou comme un *flageolet*. On y distingue le *ped*, la *bouche* et le *tuyau* proprement dit: le *ped* apporte le vent, la *bouche* fait parler, le *tuyau* contient la colonne d'air qui doit entrer en vibration et produire le son. Dans le sifflet le *ped rr'* (*Fig. 480*) apporte le vent par la *lumière ll*, la *bouche b b'* a sa *lèvre inférieure* au bord *b* de la *lumière* et sa *lèvre supérieure* au *biseau b'*. Dans le tuyau d'orgue (*Fig. 483*) le *ped* est creux, et la *lumière ll*, qui apporte le vent, n'est qu'une espèce de fente dans la plaque qui ferme la grande base du *ped*; la *bouche* est plus ou moins ouverte, c'est-à-dire, que la *lèvre supérieure b'* est plus ou moins éloignée; quelquefois cette *lèvre* est mobile pour s'approcher ou s'éloigner à volonté.

Pour donner le vent aux tuyaux dans les expériences, on se sert d'un soufflet ordinaire *ss'* (*Fig. 481*) qui se gonfle au moyen de la pédale *r*; le petit conduit *rr'* apporte le vent dans la *caisse cc'* dont la table supérieure est percée d'une douzaine de trous *oo*; ces trous sont fermés par de petites

sonpapes à ressort et s'ouvrent à volonté au moyen des touches *nn'*.

Un tuyau étant mis en place et le soufflet gonflé, on met le doigt sur la touche, et au moyen de la tige *tt'* que l'on presse plus ou moins on donne le vent avec plus ou moins de force.

Supposons d'abord que le tuyau soit *ouvert* et qu'il ait partout le même diamètre; en lui donnant le vent avec plus ou moins de force et en échangeant, s'il le faut, la largeur de la bouche, on parviendra à lui faire rendre différents sons; et si l'on représente par 1 le son *fondamental*, c'est-à-dire, le plus grave qu'il puisse donner, les autres sons suivront la série des nombres naturels 1, 2, 3, 4, etc., et quelque moyen que l'on essaie on ne parviendra jamais à lui faire rendre un son quelconque compris entre ceux-là.

Tous les tuyaux cylindriques ou prismatiques de même longueur donneront le même son *fondamental* et la même série 2, 3, 4, etc., pourvu que leur longueur soit 10 ou 12 fois leur diamètre, et que la matière qui les compose ait une rigidité convenable; seulement si les tuyaux sont très minces ils octavieront presque toujours, c'est-à-dire, qu'ils donneront le son 2 et les suivants, et il sera très difficile d'en tirer le son fondamental.

Quand le tuyau rend le son 2, on peut le couper par le milieu et enlever sa moitié supérieure sans que le son éprouve la moindre altération; de même quand il produit le son 3, on peut le diviser en trois et enlever l'un des tiers et même les deux tiers supérieurs, etc.

Ainsi pour le son 2 il y a un *ventre* au milieu de la longueur du tuyau, c'est-à-dire, que la couche d'air qui s'y trouve n'est, pendant la vibration sonore, ni raréfiée ni condensée; car si elle éprouvait un changement de densité, on ne pourrait pas en ce point faire une ouverture sans altérer le son, et à plus forte raison ne pourrait-on pas enlever la moitié supérieure du tuyau. Pour le son 3 il y a deux *ventres intermédiaires*, l'un à la fin du premier tiers, l'autre à la fin du second tiers de la longueur, car si l'on fait des ouvertures dans ces points le son n'est pas changé, et il l'est toujours si l'on fait des ouvertures ailleurs. Il y a trois ventres intermédiaires pour le son 4; 4 pour le son 5, etc.

C'est à Daniel Bernoulli que l'on doit ces expériences, et toute la théorie des instruments à vent (*Acad. des sciences*, 1762), telle à peu près qu'elle est admise aujourd'hui; on en conclut que l'onde sonore qui correspond au son fondamental d'un tuyau a la même longueur que ce tuyau; que celle qui correspond au son 2 a une longueur moitié, que celle du son 3 est $\frac{1}{3}$ du tuyau; celle du son 4, seulement $\frac{1}{4}$, etc. Car, les deux extrémités d'un tuyau ouvert sont essentiellement des ventres où la couche d'air ne peut être ni condensée ni raréfiée, puisqu'elle communique avec l'air extérieur,

et l'espace compris entre deux ventres est toujours la longueur de l'onde.

Pour les *tuyaux fermés*, la loi des vibrations est différente: on en peut faire l'expérience avec un tube de verre d'environ 30 pouces de longueur sur 1 pouce de diamètre (*Fig. 478*) dans lequel on fait glisser un piston *r*, au moyen de la tige *t*. Après avoir ajusté le tube sur une embouchure convenable on l'adapte au soufflet, comme on le voit plus en petit dans la figure 481, et en laissant passer le courant d'air d'abord très lentement on obtient le son fondamental que nous représenterons par 1; un courant un peu plus fort fait sortir le son 3; et en augmentant progressivement la force du courant par une pression croissante on fait sortir à la suite les sons 5, 7, 9, etc.; ainsi un tuyau fermé, de longueur constante, rend différents sons qui suivent la série des nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc., sans qu'il soit possible d'en faire sortir aucun son intermédiaire.

A cette loi il faut ajouter encore ce fait remarquable que le son fondamental d'un *tuyau fermé* et le son fondamental d'un *tuyau ouvert*, de même longueur, sont toujours à l'octave; et que le tuyau fermé donne le son grave ou le son 1, tandis que le tuyau ouvert donne le son aigu ou le son 2. C'est ce qu'il est facile de vérifier par l'expérience. Comme, d'une autre part, l'onde correspondante au son fondamental d'un tuyau ouvert a une longueur égale à celle du tuyau, il en résulte que l'onde correspondante au son fondamental d'un *tuyau fermé* a une longueur double de celle du tuyau. Daniel Bernoulli explique ce fait en admettant que le mouvement du son va se réfléchir sur le fond du tuyau et revient vers l'embouchure; cette hypothèse explique aussi comment le son 3 est le premier qui puisse succéder au son fondamental; car si l'on divise la longueur du tuyau en trois parties égales (*Fig. 479*), xt , xt' , t' , on pourra considérer les deux premiers tiers xt' comme formant un tuyau ouvert, qui vibre à l'unisson du tuyau fermé xt , formé par le troisième tiers, et le son produit est évidemment le son 3, puisque xt' est le tiers en longueur du tuyau ouvert qui donnerait le son fondamental, et t' aussi le tiers du tuyau fermé xt . S'il en est ainsi, le deuxième son du tuyau fermé xt doit être le même que le son fondamental d'un tuyau fermé dont la longueur serait t' ou xt' ; en effet, lorsqu'on enfonce le piston jusqu'en t on retombe exactement sur le deuxième son qui était produit lorsque le piston était en r . Il en résulte donc que, pendant les vibrations qui donnent le deuxième son, la couche d'air *r* reste dans le même état que s'il y avait là un fond fixe, c'est-à-dire, qu'elle n'éprouve point d'oscillations; elle forme alors ce qu'on appelle un *noeud*, parce qu'en réalité elle reste immobile. Ainsi pour le deuxième son d'un tuyau fermé, il y a dans la longueur de ce tuyau deux *ventres* et deux *noeuds*; le premier ventre est à l'embouchure *x*, le deuxième est aux

deux tiers de la longueur en τ , et le premier nœud est au premier tiers en τ ; le deuxième est au fond du tuyau en τ .

Pour le troisième son qui est le son 5, il y a 3 ventres et 3 nœuds : le premier ventre est toujours à l'embouchure, le deuxième aux $2/5$ et le troisième aux $4/5$; le premier nœud est à $1/5$, le deuxième à $3/5$ et le troisième à $5/5$, c'est-à-dire, au fond.

De même pour le son 7 il y a 4 ventres et 4 nœuds; pour le son 9, 5 ventres et 5 nœuds, etc.

On peut vérifier, par l'expérience, le lien et l'existence de tous les ventres et de tous les nœuds correspondants à un son quelconque; pour cela il suffit de faire des ouvertures en tous les points que nous venons de désigner comme appartenant aux ventres, le son ne sera pas changé; et l'on pourra aussi, au moyen de la tige τ du piston π (Fig. 478), pousser ce piston dans tous les points que nous venons de désigner comme appartenant aux nœuds, le son n'en recevra non plus aucune altération, il restera le même pour toutes ces positions du piston.

Il résulte de tout ce qui précède que, pour monter une gamme avec des tuyaux ouverts ou fermés en tirant seulement leur son fondamental, il suffira de prendre 7 tuyaux ouverts dont les longueurs soient entre elles comme les nombres 1, $8/9$, $4/5$, $3/4$, $2/3$, $3/5$, $8/15$, $1/2$, ou 7 tuyaux fermés dont les longueurs soient dans le même rapport. L'expérience semble en ce point s'écarter un peu de la théorie, car des tuyaux qui auraient exactement les rapports précédents donneraient une gamme fausse; mais cela tient à ce que la colonne d'air éprouve près de l'embouchure des mouvements très compliqués, et il suffit d'altérer très peu les proportions précédentes pour avoir une gamme parfaitement juste.

Lorsqu'on fait vibrer ensemble deux tuyaux qui donnent des sons très rapprochés, comme, par exemple, l'ut et l'ut dièse, on entend à de petits intervalles un renflement très sensible dans le son; c'est ce phénomène remarquable que les organistes appellent le *battement*. Sauveur en a le premier donné l'explication. Lorsque nous entendons à la fois deux sons dont l'un fait 24 vibrations, tandis que l'autre en fait 25, il est évident qu'à chaque 24 vibrations du premier ou à chaque 25 vibrations du second, les ondes sonores recommencent à partir ensemble, et leurs commencements viennent ensemble frapper l'oreille, et c'est cette coïncidence qui produit le battement. Ainsi, plus les sons diffèrent entre eux, plus les battements sont fréquents, et au contraire plus les sons approchent de se confondre et plus les battements sont rares. Ce phénomène ne s'observe que difficilement entre les sons qui résultent des vibrations des cordes, parce qu'en général ils ont une moindre intensité; cependant Rameau en a aussi reconnu l'existence, et l'on sait tout le parti qu'il en a su tirer pour fonder un système de musique dont on ne parle plus guère.

481. Loi des vibrations des lames ou des tiges.

Une lame ou une tige qui est fixée solidement par une de ses extrémités (Fig. 468) et qui est frottée par un archet on simplement écartée de sa position avec la main, exécute de τ en τ une série de vibrations isochrones qui deviennent, si elles sont assez rapides, de véritables vibrations sonores. Daniel Bernoulli a déterminé par la théorie la loi de ces vibrations; il a démontré que pour une même lame, à laquelle on donne successivement diverses longueurs vibrantes, les nombres de vibrations exécutées dans le même temps sont en raison inverse des carrés de ces longueurs.

Cette loi s'applique aux tiges cylindriques ou prismatiques et aux lames, quelle que soit la nature de leur substance; il est nécessaire également qu'il y ait homogénéité des matières et égalité de largeur et d'épaisseur dans toute leur étendue.

Cette loi peut être vérifiée par l'expérience; il suffit pour cela de fixer sur la table d'une caisse sonore, des tiges de fer ou de laiton, par exemple, des fils de 1 ou 2 lignes de diamètre coupés au même bout, et de leur donner des longueurs qui

soient entre elles comme les nombres 1, $\sqrt{\frac{8}{9}}$,

$\sqrt{\frac{4}{5}}$, $\sqrt{\frac{3}{4}}$, $\sqrt{\frac{2}{3}}$, $\sqrt{\frac{3}{5}}$,
 $\sqrt{\frac{8}{15}}$, $\sqrt{\frac{1}{2}}$. Les sons résultants formeront une gamme juste.

C'est là précisément ce qui se trouve réalisé dans l'instrument que l'on appelle le *violon de fer*, qui est représenté dans la figure 484, vu en-dessus et vu de face; on lui donne cette forme arrondie afin que l'archet ne touche qu'une tige à la fois.

Une seule tige peut comme un seul tuyau produire une série de sons différents, par divers modes de vibration. Le mode que nous venons de considérer donne le son fondamental, les modes suivants offrent successivement 1, 2, 3 nœuds de vibration et donnent des sons de plus en plus aigus. Chladni a démontré par l'expérience que le son fondamental étant représenté par 4, le deuxième son correspondant à 1 nœud de vibration est représenté par 25; et que si celui-ci est représenté par 3^2 , les suivants pour 2 nœuds, 3 nœuds, etc., se trouvent représentés par la série des nombres 5^2 , 7^2 , 9^2 , etc.

482. Loi des vibrations de la sirène. — Cet instrument a reçu de son inventeur, M. Cagniard de la Tour, le nom de *sirène*, parce qu'il a, comme nous le verrons plus tard, la propriété d'exciter directement des vibrations sonores dans l'eau et dans les divers fluides. Nous allons d'abord examiner sa

construction et les vibrations qu'il produit dans l'air.

$\tau \tau'$, (Fig. 491.) Boîte cylindrique en cuivre, de 2 ou 3 pouces de diamètre et d'environ 1 pouce de hauteur; la surface supérieure de la table $\tau \tau'$ est plane et très bien polie.

$s s'$, ouverture percée au milieu du fond $\tau \tau'$.

$\tau \tau'$, tuyau *porte-vent* qui se visse ou s'ajuste dans l'ouverture $s s'$.

v , ouvertures percées dans la table $\tau \tau'$; elles sont disposées circulairement et équidistantes entre elles (Fig. 490); on en peut faire 10, par exemple, et on leur donne de telles dimensions que les intervalles pleins qui les séparent aient un peu plus de largeur que les ouvertures elles-mêmes.

$\tau \tau'$, plateau mobile dont la surface inférieure s'applique exactement sur la table, sans cependant exercer de frottement sensible.

x , axe autour duquel le plateau $\tau \tau'$ peut tourner d'un mouvement plus ou moins rapide.

v , ouvertures percées dans le plateau $\tau \tau'$, et exactement correspondantes aux ouvertures v de la table, par leur nombre, leur position et leurs distances respectives, (Fig. 490). Ainsi toutes les ouvertures de la table sont ouvertes à la fois ou fermées à la fois, suivant que la rotation du plateau amène sur elles les ouvertures v ou les intervalles pleins qui séparent ces ouvertures.

τ , vis sans fin qui se trouve vers la partie supérieure de l'axe de rotation x .

$a a'$, roue de 100 dents que la vis sans fin met en mouvement.

$c c'$, roue indépendante qui ne passe qu'une dent pour chaque révolution de la roue $a a'$; c'est un bras fixé à l'axe de $a a'$ qui vient la pousser d'un cran.

Les axes de ces roues portent des aiguilles qui parcourent des cadrans divisés u et v (Fig. 489); ces aiguilles et les roues qui les mettent en mouvement forment le *compteur* de la sirène. On peut à volonté faire marcher le compteur ou l'arrêter; pour cela il suffit de presser le bouton s pour faire engrener la roue $a a'$ avec la vis sans fin, ou le bouton s' pour désengrener; dans ce dernier cas les dents de cette roue vont heurter contre un arrêt qui amortit immédiatement la vitesse acquise.

Nous devons ajouter encore que les ouvertures du plateau sont inclinées aux faces (Fig. 480), de telle sorte que la vitesse du vent qui est poussé dans la boîte par le porte-vent suffit pour imprimer au plateau un mouvement de rotation de plus en plus rapide.

Cela posé, pour comprendre le jeu de la sirène comme instrument d'acoustique, imaginons pour un moment qu'il n'y ait qu'un seul trou dans la table et 10 dans le plateau. Alors, pendant une révolution du plateau le trou de la table sera 10 fois ouvert et 10 fois fermé, et par conséquent l'éclatement de l'air qui arrive par le porte-vent, aura lieu 10 fois et sera 10 fois arrêté. Cet effet se

produira dans 1" ou dans 1"/10 ou dans 1"/100 suivant que le plateau fera 1 tour, 10 tours ou 100 tours par seconde; et comme l'air qui est vivement poussé et brusquement arrêté produit à chaque alternative une vibration, il en résulte que l'on aura de la sorte 20 vibrations pour chaque tour du plateau, et par conséquent 20, 200 ou 2000 vibrations par seconde. Ainsi la sirène doit rendre des sons qui montent par degrés, ou plutôt par nuances insensibles, depuis le plus grave jusqu'au plus aigu. Et c'est en effet ce que l'expérience confirme. Maintenant si au lieu de supposer, comme nous l'avons fait, un seul trou dans la table, on suppose qu'il y en ait 10 comme dans le plateau, on aura seulement un son 10 fois plus intense, car chaque trou produira son effet comme s'il était seul.

Le nombre, la forme et la grandeur des trous paraissent avoir sur le timbre du son une influence dont jusqu'à présent on ne s'est rendu compte que par des considérations trop peu rigoureuses pour qu'il nous soit permis de les développer; il en est de même des divers effets que l'on obtient en laissant entre les trous des intervalles pleins plus ou moins grands; seulement M. Cagniard de la Tour pense que si les intervalles pleins sont très petits le son se rapproche de la voix humaine, et que s'ils sont très grands le son se rapproche de celui de la trompette. Enfin l'épaisseur de la table et celle du plateau doivent aussi imprimer au son des caractères particuliers qui sont encore trop peu étudiés.

On voit par les notions précédentes qu'il ne faudrait pas songer à faire de la sirène un instrument de musique; mais elle est un instrument d'acoustique très ingénieux et qui peut servir à résoudre une foule de questions fondamentales sur la théorie du son et sur les phénomènes physiques qui en dépendent.

483. *Détermination d'un son fixe ou du nombre absolu des vibrations qui correspondent à un son donné.*

On peut compter le nombre absolu des vibrations qui correspondent à un son quelconque, au moyen de la sirène, au moyen des larmes, des tuyaux et des cordes.

1°. Supposons, par exemple, que l'on se propose de déterminer au moyen de la sirène le nombre des vibrations qui correspondent au son du *diapason* dont on se sert pour accorder les instruments de musique. Pour cela on devra mettre sur la table du soufflet (Fig. 481), un tuyau ouvert ou fermé dont le son fondamental soit à l'unisson du diapason; ensuite à côté de ce tuyau on mettra le tuyau porte-vent de la sirène, et en modifiant sans cesse la pression de l'air du soufflet avec la tige $t t'$, on parviendra à mettre la sirène à l'unisson avec le tuyau voisin, et à soutenir cet unisson pendant quelques minutes. Lorsqu'on sera exercé à produire et à maintenir cet unisson avec une grande exactitude, il faudra à un instant donné, pendant

que les sons se produisent, presser à la fois le bouton du compteur de la sirène pour faire engrener la roue et le bouton d'un bon chronomètre pour mesurer le temps; ensuite après avoir écouté l'accord attentivement pendant 2' environ, il faudra arrêter à la fois le compteur et le chronomètre. On aura ainsi par le compteur le nombre des vibrations, et par le chronomètre le temps qui s'est écoulé; ce qui permettra de déduire aisément combien il y a eu de vibrations en 1". Dans quelques-unes de ses expériences M. Cagniard de la Tour avait imaginé de placer la sirène sur un gazomètre et de maintenir l'uniformité du mouvement par des volumes diversement combinés; mais le moyen précédent me semble plus simple et plus sûr. Au reste, on trouve toujours à peu près le même résultat, savoir: que le *la* du diapason ordinaire correspond à 427 vibrations par seconde.

2°. Pour compter le nombre absolu des vibrations au moyen des tiges ou des lames, M. Chladni dispose l'expérience de la manière suivante: il choisit une lame de laiton bien homogène d'une demi-ligne d'épaisseur et d'un demi-pouce de largeur; il la pince dans un état bien fixe (Fig. 468) en lui donnant au dehors une longueur telle qu'elle fasse 4 vibrations en 1". Ces vibrations sont assez lentes pour être comptées avec exactitude pendant plusieurs minutes. Alors on desserre la lame après en avoir mesuré la longueur avec précision et on l'enfonce dans l'état de manière à diminuer de plus copios sa longueur vibrante, jusqu'à ce qu'elle soit, par exemple, à l'unisson du diapason; alors on en mesure de nouveau la longueur, et par la comparaison de cette deuxième expérience avec la première, on en déduit le nombre des vibrations d'après la loi que nous avons donné précédemment (430), savoir: que les nombres des vibrations sont en raison inverse des carrés des longueurs.

Le son est plus soutenu et plus facile à comparer lorsqu'on l'obtient avec un archet, mais il faut avoir grande attention de faire vibrer la lame dans toute sa longueur sans y déterminer des nœuds de vibration.

3°. Le *battement* des tuyaux (page 310) fut employé par Sauveur à déterminer sa son fixe, à une époque où l'on ne connaissait encore ni les lois des vibrations des cordes, ni celles des vibrations des lames. Il fallait sans doute un génie bien pénétrant pour analyser ce phénomène, l'expliquer et en faire en même temps une si heureuse application. Imaginons avec Sauveur, que l'on ait trois tuyaux de plusieurs pieds de longueur et qu'on les accorde de manière que le premier donne, avec le deuxième, la tierce ut mi, et avec le troisième la tierce mineure ut mi♭. Alors le nombre des vibrations de ut étant 1 ou 20/20, celui de mi sera 6/4 ou 25/20, et celui de mi♭ 5/4 X 24/25 = 24/20. Ainsi pendant que ut fera 20 vibrations, mi♭ en fera 24 et mi 25. Or, si l'on fait résonner ensemble le mi et le mi♭, on entend des battements très prononcés et assez

distants pour que l'on puisse les compter pendant plusieurs minutes. Supposons que l'on en compte 480 en 2', ce sera 4 battements par seconde, c'est-à-dire qu'à chaque seconde, le mi et le mi♭ se rencontrent 4 fois; mais il faut évidemment 25 vibrations de mi et 24 de mi♭ pour faire une rencontre; donc mi fera 100 vibrations par seconde et mi♭ seulement 96, et par conséquent ut n'en fera que 80. Tels sont dans cette hypothèse les nombres de vibrations correspondants à ces sons; il suffira ensuite de connaître le rang qu'ils occupent dans le clavier pour en déduire les nombres absolus de vibration de tous les sons.

4°. Le P. Mercator avait essayé de déterminer le nombre de vibrations des sons au moyen des cordes, mais on ne connaissait pas alors la formule générale de Taylor qui établit une relation entre la durée des oscillations, la longueur de la corde, sa nature et sa tension. Cette formule est la suivante:

$$N = \frac{gP}{cL}$$

N, nombre des vibrations en 1" sexagésimale.

g, gravité ou 9806,8088.

P, poids qui tend la corde,

L, longueur de la corde.

c, poids de la longueur L de la corde.

On voit d'après cela que pour trouver par le calcul le nombre des vibrations que fait une corde lorsqu'elle rend un son quelconque, il suffit de connaître le poids P qui lui donne sa tension, et la distance L des deux chevalets; pour la valeur de c, on la déduira aisément après avoir pesé une longueur arbitraire de la corde. En substituant ces nombres dans la formule on aura le carré du nombre des vibrations exécutées en 1".

On trouve dans les mémoires de l'Académie de Berlin, pour 1822 et 1823, les résultats de plusieurs expériences faites de cette manière avec beaucoup de soin par M. Fischer. Voici les nombres auxquels il est parvenu pour les diapasons de différents orchestres.

Diapason du théâtre de Berlin 427,32 vibrat. en 1".

- grand opéra français 431,34
- Feydeau 427,61
- théâtre Italien . . . 424,17.

On a coutume d'appeler ut, l'ut du violoncelle, et *re*, *mi*, etc., la gamme que l'on obtient en le prenant pour point de départ; puis *ut*, *mi*, etc., la gamme qui forme l'octave aiguë de la première; *ut*, *mi*, etc., celle qui forme l'octave de la deuxième; etc.

Comme le *la* du diapason est un *la*, il en résulte qu'à Berlin le *la* du violoncelle fait $\frac{427,32}{4} = 218,66$ vibrations en 1", et comme le nombre des vibrations de l'ut est les 3/5 de celles du *la*, il en résulte que l'ut du violoncelle fait à Berlin 129,2 vibra-

tions en 1'', tandis qu'au théâtre Italien il ne fait que 127,23 vibrations ; c'est une vibration de moins.

La voix d'homme s'étend en général du sol¹ au fa², et celle de femme du ré³ au la⁴ :

Sol, corresp. à 127,2. 3/2. = 190,8 vibrat. en 1''.
 Fa² à 127,2. 4/3. 4 = 678,4
 Ré³ à 127,2. 9/8. 4 = 572,4
 La⁴ à 127,2. 5/3. 8 = 1606.

Ainsi la voix d'homme fait 190 vibrations par seconde pour le son le plus grave et 678 pour le son le plus aigu, et la voix de femme 572 vibrations pour le son le plus grave et 1606 pour le son le plus aigu. Au théâtre de Berlin le la⁴ correspond à 1707 vibrations ; c'est par conséquent 100 vibrations par seconde de plus qu'au théâtre Italien. La plupart des voix peuvent s'élever de beaucoup au-dessus du la⁴, et il n'y a sans doute pas d'exagération à supposer que la voix humaine puisse exécuter souvent plus de 3 ou 4 mille vibrations par seconde.

Les sons les plus aigus que nous puissions entendre, ceux qui résultent, par exemple, du mouvement des ailes de certains insectes, s'élèvent sans doute à plus de 12 ou 15 mille vibrations par seconde. Or il est bien probable que la membrane du tympan se met à l'unisson avec le son qu'elle entend, et qu'ainsi elle est capable d'exécuter en 1'', depuis les 32 vibrations qui forment le son le plus

grave jusqu'aux 12 ou 15 mille vibrations qui forment le plus aigu des sons perceptibles.

484. *De la longueur absolue des ondes sonores.*— Pour déterminer la longueur absolue des ondes sonores dans un milieu quelconque, il suffit de connaître la vitesse avec laquelle le son se propage dans ce milieu et le nombre des vibrations qui produisent le son. Dans l'air, par exemple, la vitesse du son étant de 340 mètres par seconde, il est évident qu'un son qui résulterait de 340 vibrations par seconde donnerait des ondulations de 1 mètre de longueur ; car chaque vibration excite une onde, et les 340 ondes qui sont excitées en 1'' occupent précisément 340 mètres de longueur. On voit donc qu'en général la longueur de l'onde est le quotient de la vitesse du son par le nombre des vibrations. Ainsi la longueur de l'onde que donne l'ut du violoncelle du théâtre Italien est

$\frac{340}{127,23} = 2^{\text{m}}, 6$ ou 8 pieds à très peu près. Ainsi l'ut du violoncelle se trouve à l'unisson avec un ténor ouvert de 8 pieds ou avec le bourdon de 4 pieds, comme l'indique la théorie de Bernoulli (480).

La longueur de l'onde qui correspond au la⁴ est $\frac{340}{1606} = 0,21$ ou environ 8 pouces. Et celle qui correspond au la² serait de 1 pouce ; c'est déjà un son excessivement aigu, mais il paraît cependant que l'on peut encore le regarder comme un son musical.

CHAPITRE III.

VIBRATIONS DES CORPS SOLIDES.

485. *Vibrations des corps dont deux dimensions sont petites par rapport à la troisième. Tubes, verges cylindriques, verges prismatiques, etc.*

Nous avons déjà vu (481) que les lames, les tiges ou les cylindres peuvent éprouver des vibrations rapides ou exciter des ondes sonores lorsqu'on les ébranle perpendiculairement à l'axe ; ces vibrations, dont les lois sont assez simples, se nomment *vibrations transversales*. Nous allons maintenant considérer les *vibrations longitudinales*, c'est-à-dire, celles que l'on peut exciter dans les tubes, les verges ; les cordes, etc., en imprimant à leurs molécules des vitesses parallèles à l'axe.

Supposons, par exemple, que l'on prenne un tube de verre d'environ deux mètres de longueur et de trois ou quatre centimètres de diamètre, et qu'en le soutenant d'une main juste en son milieu, on exerce de l'autre main, sur l'une de ses moitiés,

une légère friction avec un morceau de drap mouillé, à l'instant on entendra un son, et avec un peu d'exercice on parviendra à lui donner beaucoup d'éclat et de pureté. Les vibrations que l'on détermine ainsi sont évidemment des vibrations longitudinales. En frottant toujours de la même manière par un mouvement de va et vient, mais avec plus ou moins de vitesse et en pressant plus ou moins, on pourra produire une série de sons différents, et si l'on représente par 1 le premier son de la série, c'est-à-dire le plus grave, il sera facile de constater que les autres sont représentés par la suite des nombres naturels 2, 3, 4, etc. Il faudra déjà beaucoup d'habitude et d'habileté pour faire sortir le son 4 quand le tube n'aura que deux mètres de longueur ; comme nous l'avons supposé.

On obtiendra les mêmes résultats avec de longues lames prismatiques de verre, ou avec des cylindres

pleins de la même substance, et aussi avec des tubes, des lames et des cylindres de bois ou de métal. Seulement pour ces derniers il sera souvent plus commode d'adopter un autre mode d'ébranlement : au lieu de frotter avec du drap mouillé, on pourra frotter avec du drap enduit de résine ; ou, ce qui sera plus sûr encore, ce sera de fixer avec du mastic ou de la cire à cacheter, à l'une des extrémités des cylindres ou des lames et sur le prolongement de leur axe, un petit tube de verre creux ou plein, d'environ un décimètre de longueur et de 5 ou 6 millimètres de diamètre ; c'est alors ce tube auxiliaire qui sera ébranlé avec du drap mouillé, et si le mastic ou la cire ont été bien fondus et établissent une continuité parfaite, les vibrations se communiqueront sans peine.

Ainsi quand les verges droites sont soutenues au milieu et libres à leurs extrémités, elles vibrent comme les tuyaux enverts, et *rendent des sons qui suivent la série des nombres naturels 1, 2, 3, 4, etc.*

Il est facile de s'assurer par l'expérience que *des verges de même substance sont toujours d'unisson pour leur son fondamental quand elles ont la même longueur*, quelle que soit leur largeur ou leur épaisseur ; pourvu toutefois que ces deux dimensions restent toujours petites par rapport à la troisième. Ainsi toutes les verges de verre de 6 pieds de longueur donneront le même son, qu'elles soient minces ou épaisses et qu'elles soient travaillées en lames, en tubes ou en cylindres. Mais, à égalité de longueur, des verges de diverses substances donneront des sons différents. On remarquera cependant que des verges très longues donneront le son 2 ou le son 3 plus facilement que le son fondamental. Ces résultats complètent l'analogie que nous venons de remarquer entre les vibrations des verges libres à leurs extrémités et celles des tuyaux ouverts.

Pendant que ces masses solides sont en vibration, le mouvement se distribue très inégalement dans toutes leurs molécules ; la plupart d'entre elles font des excursions plus ou moins grandes ; et il y en a au contraire, mais en petit nombre, qui restent toujours en repos. La série des points de repos forme sur la surface des lignes que l'on nomme *lignes nodales* ; et nous allons faire voir, d'après les ingénieuses observations de M. Savart, que, dans les vibrations dont il s'agit, les lignes nodales tracent, autour des tubes et des cylindres, des courbes à peu près semblables aux *hélices*, c'est-à-dire aux *filets d'une vis*, et que les courbes plus irrégulières qu'elles tracent autour des lames prismatiques semblent imiter encore des hélices plus ou moins imparfaites.

Supposons d'abord que l'on expérimente sur un long tube de verre dont on tire seulement le son fondamental : on tient ce tube à peu près horizontalement ; sur celle de ses moitiés qui n'est pas frottée avec le drap mouillé on passe un anneau en

papier très léger (Fig. 486), ayant, par exemple, un diamètre double ou triple de celui du tube, et l'on observe les mouvements de cet anneau qui est analogue aux petits chevrons de papier dont Sauveur faisait usage pour montrer les nœuds des cordes vibrantes (479). Aussitôt que le son se fait entendre l'anneau glisse sur la surface du tube avec une grande vivacité et s'arrête enfin en un certain point auquel il revient sans cesse quand on l'écarte. On marque ce point avec de l'encre ; il fait évidemment partie de la ligne nodale. Ensuite on fait un peu tourner le tube dans la main, pour amener en-dessus une autre arête sur laquelle repose l'anneau, et l'on recommence les vibrations ; on voit encore l'anneau qui glisse et s'arrête ; ce qui donne un second point de la ligne nodale que l'on marque comme le premier. En continuant de tourner le tube peu à peu et dans le même sens, on peut successivement marquer tous les points de la ligne nodale, et l'on démontre ainsi qu'elle forme une espèce d'hélice dont le pas est très allongé et qui fait plusieurs révolutions autour du tube. C'est ce que nous avons essayé de représenter dans la figure 485. En retournant le tube pour mettre l'anneau sur son autre moitié, on y retrouve une courbe toute pareille, avec cette circonstance singulière que l'une de ces courbes n'est pas la continuation de l'autre, mais que toutes deux semblent partir du milieu et s'enrouler dans le même sens.

Il arrive quelquefois, mais rarement, que l'hélice, après avoir tourné dans un sens, par exemple de droite à gauche, se retourne subitement dans le sens contraire ou de gauche à droite ; et quand cet accident se manifeste sur l'un des bouts du tube, ou plutôt sur l'une de ses moitiés, il se manifeste sur l'autre, à peu près à la même distance de l'extrémité.

La surface intérieure du tube présente une ligne nodale tout-à-fait pareille à celle que nous venons de tracer sur la surface extérieure ; mais ces deux lignes sont *diamétralement opposées*, c'est-à-dire, que si l'on conçoit le tube, coupé en deux parties égales parallèlement à l'axe (Fig. 486) ; et qu'il se trouve, par exemple, deux points de la ligne nodale v, v' sur l'arête extérieure qui est en dessus, il y aura deux points de repos correspondans s, s' sur l'arête intérieure qui est en dessous ; et réciproquement les deux points de repos s, s' de l'arête extérieure qui est en dessous se retrouveront verticalement en s, s' sur l'arête intérieure qui est en dessus.

Pour constater la trace de la ligne nodale intérieure, M. Savart met dans le tube bien desséché, un peu de sable dont les grains soient pareillement très secs et assez gros, ou bien une petite balle de liège ou de cire. Le sable ou les balles présentent souvent dans ces expériences des mouvements de rotation singuliers qui dépendent de l'opposition des vitesses de part et d'autre de la ligne nodale.

Lorsqu'au lieu de tirer d'un tube le son fondamental on tire les sons 2, 3 ou 4, on retrouve encore des lignes nodales analogues aux précédentes; seulement pour le son 2 il y a toujours *deux renversements* dans la direction de l'hélice: c'est-à-dire qu'en partant de l'une des extrémités du tube, l'hélice tourne, par exemple, de droite à gauche jusqu'au premier quart de la longueur environ; là elle se renverse pour tourner de gauche à droite jusqu'au troisième quart; et là enfin elle se renverse encore pour tourner, comme elle faisait d'abord, de droite à gauche. Pour le son 3 il y a *trois renversements*; le premier au premier sixième de la longueur, le deuxième au troisième sixième et le troisième au cinquième sixième. Pour le son 4, *quatre renversements*; savoir au premier huitième de la longueur, au troisième huitième, au cinquième huitième, et au septième huitième.

Les lignes nodales des lames et des verges prismatiques ne sont ni aussi simples ni aussi faciles à tracer. En projetant du sable sur une lame longue et étroite, on le verra pendant les vibrations longitudinales glisser vivement, et s'accumuler en certaines positions où il formera des lignes droites perpendiculaires aux arêtes, c'est-à-dire exactement transversales (Fig. 505); et quand on retourne cette lame pour amener en dessus la surface qui était en dessous, l'on obtient encore un résultat analogue; mais les nœuds de cette face, au lieu de correspondre à ceux de la première, se trouvent précisément opposés (Fig. 506). Cette opposition est mieux marquée par la figure 510, qui représente une coupe de la lame dans laquelle les nœuds de la face inférieure sont représentés comme on les obtient quand cette face est en dessous.

Lorsqu'une lame est assez épaisse pour que l'on puisse observer ce qui se passe sur sa tranche, on reconnaît à peu près la disposition de ligne nodale qui est représentée dans la figure 458. Tel est du moins le résultat auquel M. Savart a été conduit dans une de ses expériences. La lame sur laquelle il opérait, était une barre de fer carrée, d'un mètre de longueur et de deux centimètres de côté. Les vibrations étaient imprimées en frappant de petits coups de marteau contre l'une des extrémités. Et l'on voit sur les tranches des lignes nodales serpentine qui vont établir une liaison entre les nœuds opposés des faces supérieures et inférieures.

Enfin, quand la largeur des lames est un peu grande relativement à l'épaisseur, les lignes droites transversales disparaissent sur les faces supérieures et inférieures, ou plutôt elles se contournent, de manière à présenter à l'œil une toute autre apparence. La figure 487 est celle que l'on obtient avec une lame de 4 ou 5 centimètres de largeur et de quelques millimètres d'épaisseur seulement. Les traits ponctués marquent la forme et la position de la ligne nodale que donne la face inférieure quand elle est en dessous, et il n'y a aucun doute que cette ligne nodale ne se produise en des-

sous pendant que l'on observe en dessus la ligne nodale qui est marquée par les traits pleins.

Lorsque les verges, dont nous venons de parler, sont *fixées par un bout*, soit qu'elles se trouvent *pinces* dans un étai ou *encastrées* dans une masse solide, elles peuvent encore entrer en vibrations longitudinales et produire des phénomènes analogues aux précédents.

La série des sons qu'elles donnent alors est représentée par la suite des nombres 1, 3, 5, etc., comme celle des tuyaux fermés par un bout. Quant à leurs lignes nodales elles sont, à quelques modifications près, les mêmes que celles des verges libres.

Enfin l'on peut fixer les verges à leurs deux extrémités, en les scellant dans des pièces solides et tout-à-fait immobiles; les sons qu'elles produisent, les lignes nodales qu'elles présentent dans ces circonstances semblent ne différer en rien des sons et des lignes nodales que l'on obtient d'elles quand elles sont libres. Ces sortes d'expériences, qui sont en général très difficiles, deviennent simples et faciles lorsqu'on les fait sur des cordes d'instrument.

La figure 506 représente une corde ordinaire qui est disposée pour entrer en vibrations longitudinales.

ss', règle en bois forte et épaisse.

aa', tige d'acier solidement fixée dans la règle ss'.

cu', corde vibrante; elle s'attache à la tige aa' par un nœud coulant, et elle passe sur le chevalet u pour aller se fixer à la clef t, qui sert à la tendre plus ou moins.

On frotte la tige aa' vers son extrémité supérieure, avec un archet qu'il faut avoir soin de tenir exactement parallèle à la corde, alors celle-ci entre en vibration d'une manière très sensible. Si l'on met sur sa longueur de petits chevrons ou de petits anneaux de papier, et si l'on retourne l'appareil sur lui-même jusqu'à mettre la corde en dessous, il est facile de constater que, même sur un cylindre de si petites dimensions, il se forme encore une ligne nodale en hélice, comme dans les expériences précédentes.

Outre les vibrations transversales et longitudinales, les verges droites peuvent exécuter encore des *vibrations normales* et des *vibrations tournoyantes*. Ces dernières ne peuvent être excitées que dans les verges qui sont fixées par un bout; pour cela, Chladni se contente de passer l'archet très légèrement sur une section perpendiculaire à leur axe, en prenant toutes les précautions nécessaires pour ne pas exciter les vibrations transversales dont nous avons parlé (481); et mouvement de l'archet imprimé à la verge une sorte de torsion qui va et revient assez rapidement pour produire des ondes sonores. Les *vibrations normales* se trouvent toujours mêlées aux vibrations longitudinales, et avec une telle complication, que le calcul doit ve-

nir au secours de l'expérience pour distinguer nettement ce qui appartient à chacune. Mais il nous suffira d'indiquer ici ces deux derniers modes de vibrations, pour faire comprendre qu'ils sont essentiellement liés aux deux premiers, et qu'ils dépendent comme eux de l'élasticité de la matière, tellement, que l'un de ces modes étant connu, les trois autres s'en déduisent nécessairement. Si la science n'est pas encore parvenue à établir cette dépendance d'une manière générale et complète, elle peut du moins, dans quelques cas particuliers, déterminer certains modes de vibrations quand d'autres sont donnés. Voici sur ce point curieux quelques résultats que l'on doit à M. Poisson. (*Mémoire sur l'équilibre et le mouvement des corps élastiques.*)

1^o. Le carré du nombre des vibrations longitudinales d'une corde est au carré du nombre de ses vibrations transversales dans le même temps, comme sa longueur est à l'allongement qu'elle a éprouvé par la tension qu'elle supporte.

$$\text{Ou.} \dots\dots\dots \frac{n^2}{n'^2} = \frac{L}{\Delta}$$

L , longueur de la corde qui vibre d'abord longitudinalement, et ensuite transversalement.

Δ , allongement que cette corde a éprouvé, en vertu de la tension qu'elle supporte.

n , nombre des vibrations longitudinales qu'elle exécute dans un certain temps.

n' , nombre des vibrations transversales qu'elle exécute dans le même temps.

2^o. Lorsqu'une verge est eucastée par une de ses extrémités, et qu'elle exécute successivement des vibrations longitudinales et des vibrations tournantes, on a

$$\frac{n^2}{n'^2} = \frac{5}{2}$$

n est le nombre des vibrations longitudinales.

n' , ... tournantes.

Ainsi, le rapport est indépendant de la longueur et de l'épaisseur.

3^o. Lorsqu'une verge cylindrique est libre par ses deux bouts, le nombre des vibrations longitudinales qu'elle accomplit dans un certain temps est au nombre des vibrations transversales qu'elle accomplit dans le même temps, comme 100 fois sa longueur est à 356 fois son rayon;

$$\text{Ou.} \dots\dots\dots \frac{n}{n'} = \frac{100 L}{356 r}$$

L , longueur de la verge cylindrique; r , son rayon; n , nombre des vibrations longitudinales; n' , nombre des vibrations transversales. Les nombres n et n' se rapportent au son fondamental de chaque genre de vibration.

4^o. En appliquant la proposition précédente à une

verge parallépipédique de longueur L , dont l'épaisseur est représentée par x , on a

$$\frac{n}{n'} = \frac{100 L}{208 x}$$

Ces deux dernières propositions ont été vérifiées par des expériences de M. Savart. Mais comme une verge doit être longue pour donner un son fondamental facile à apprécier, lorsqu'elle vibre longitudinalement, et que c'est le contraire quand elle vibre transversalement, il est nécessaire d'employer deux verges pour faire la comparaison; par exemple, une verge de 1 mètre pour les vibrations de la première espèce, et une autre de 1/8 de mètre pour celle de la seconde espèce. Ayant trouvé que la verge de 1 mètre fait 1000 vibrations longitudinales, on saura bien par ce que nous avons dit précédemment, que, si l'on pouvait apprécier le son que produit une verge de même matière et de 1/8 de mètre, il correspondrait à 8000 vibrations. C'est ainsi que les valeurs de n ont été déduites pour former le tableau suivant.

1^o. Verge parallépipédique en cuivre jaune.

$L = 1/8$ (0^m,825), $x = 3^{mm},92$ $n = 34133$

Le calcul donne. { $n' = 2668$

L'observation a donné. . . { $n' = 2667$

Différence. + 1

2^o. Verge cylindrique en cuivre jaune.

$L = 1/8$ (0^m,825), $r = 2^{mm},4$ $n = 34133$

Le calcul donne. { $n' = 2629$

L'observation a donné. . . { $n' = 2844$

Différence. - 15

3^o. Verge cylindrique en cuivre rouge.

$L = 1/8$ (0^m,825), $r = 1^{mm},7$ $n = 36904$

Le calcul donne. { $n' = 2164$

L'observation a donné. . . { $n' = 2133$

Différence. + 31

4^o. Verge cylindrique en fer.

$L = 1/8$ (0^m,88), $r = 2^{mm},5$ $n = 45514$

Le calcul donne. { $n' = 3683$

L'observation a donné. . . { $n' = 3686$

Différence. - 3

5^o. Verge parallépipédique en verre.

$L = 1/8$ (0^m,907), $x = 6^{mm},4$ $n = 42667$

Le calcul donne. { $n' = 4645$

L'observation a donné. . . { $n' = 4608$

Différence. + 37

6^o. Verge parallépipédique en verre.

$L = 1/8$ (0^m,967), $x = 2^{mm},6$ $n = 42667$

Le calcul donne. { $n' = 1887$

L'observation a donné. . . { $n' = 1843$

Différence. + 44

7°. Verge parallépipédique en bête.

$$l = 1/8 (0^m, 8925), \kappa = 2^m, 8 \quad n = 40960$$

$$\text{Le calcul donne. . . . } \{n' = 2114$$

$$\text{L'observation a donné. . . } \{n' = 2048$$

Différence. . . . + 66

On voit dans tous ces résultats un accord assez satisfaisant entre le calcul et l'observation.

Les expériences 1° et 2° font bien voir que le nombre des vibrations longitudinales ne dépend que de la longueur; et elles montrent en même temps que les vibrations transversales ne sont pas simplement proportionnelles à l'épaisseur, puisqu'alors la deuxième valeur de n' , déduite de la première, serait 3265 au lieu de 2844. La théorie de M. Poisson indique, en effet, que ces vibrations sont modifiées par la forme, et que, toutes choses égales d'ailleurs, il faut multiplier les vibrations

parallépipédiques par $\sqrt{\frac{3}{4}}$ pour obtenir les vibrations cylindriques. Aussi, en multipliant 3265

par $\sqrt{\frac{3}{4}}$, obtient-on 2828 qui diffère très peu de 2829, résultat de l'expérience directe.

Dans les expériences 5° et 6°, l'influence de la forme a disparu, puisque les verges sont l'une et l'autre parallépipédiques, et l'on trouve en effet que les vibrations transversales sont simplement proportionnelles aux épaisseurs.

486. *Vibrations des corps dont une seule dimension est petite par rapport aux deux autres. Plaques, membranes, cloches, etc.*

Pour faire vibrer les plaques on emploie ordinairement une pince semblable à celle qui est représentée dans la figure 507. La vis r sert à fixer la pince elle-même sur une table ou sur quelque corps très solide, et la vis t sert à presser la plaque contre un petit cylindre saillant c ; les extrémités de la vis et du cylindre doivent être garnies d'un morceau conique de peau de bœuf, ferme et épais. La plaque étant ainsi fixée, soit par son centre, soit par un point plus ou moins rapproché de son bord libre, on l'ébranle avec un archet qui la frotte perpendiculairement à son plan. Le son qu'elle donne est en général assez net, pour qu'on puisse en prendre le ton sur un piano ou sur quelque autre instrument.

Sans rien changer à la disposition de la plaque et presque sans modifier le mouvement de l'archet, on peut obtenir des sons très différents, dont la série est tellement accidentelle et variable qu'il est à peu près impossible de la reproduire identiquement la même, dans plusieurs expériences successives. Mais s'il est difficile d'énumérer et de définir les sons que peut produire une plaque fixée d'une manière quelconque, il est toujours possible de découvrir, dans tous les cas, comment se partage sa masse en parties vibrantes et en lignes de repos.

Pour cela, on maintient la plaque horizontalement pendant ses vibrations, et l'on répand sur sa surface supérieure un peu de sable sec et fin; alors, au premier son qui est produit, le sable entre en mouvement; il saute et retombe plusieurs fois en une secousse; et, toujours repoussé par toutes les parties vibrantes, il va s'accumuler sur les parties immobiles, et marquer ainsi l'espace qu'elles occupent sur la plaque. Les lignes qui composent toutes les figures dessinées par le sable sont ce que l'on appelle les *lignes nodales*.

Galilée avait indiqué le premier (*Dialogues*) cet ingénieux moyen d'observer les lignes nodales; mais on peut dire que Chladni l'a inventé de nouveau en 1787, et que, par les belles applications qu'il en a faites il a ouvert en acoustique un vaste champ de découvertes. (CALAND, *Traité d'Acoustique*.)

Nous n'entreprendrons pas de retracer ici toutes les lignes nodales qu'une même plaque peut donner; car ces lignes paraissent être en nombre indéfini; mais nous essaierons d'indiquer divers systèmes généraux, auxquels on peut rapporter toutes les lignes nodales des plaques circulaires, rectangulaires, triangulaires, etc.

Les plaques circulaires peuvent donner un *système diamétral*, un *système concentrique* et un *système composé*.

Le *système diamétral* est uniquement composé de diamètres qui divisent la circonférence en un nombre pair de parties égales: dans la figure la plus facile à obtenir on compte 2 diamètres, et 4 parties dans la circonférence (Fig. 511), ensuite 3 diamètres et 6 parties, etc.

Dans les cercles de métal qui ont 3 ou 4 décimètres de diamètre, on peut souvent compter jusqu'à 36 ou 40 parties (Fig. 512) dans la circonférence; il est facile de voir pourquoi, dans ce mode de division par lignes droites, les parties doivent être toujours égales et en nombre pair: car, 1° il est évident que toutes ces parties doivent vibrer à l'unisson, c'est-à-dire accomplir dans le même temps le même nombre d'oscillations, et puisqu'elles sont disposées de la même manière, il faut bien qu'elles soient égales en étendue; 2° on peut démontrer par le raisonnement et confirmer par l'expérience que deux secteurs, ou, en général, que deux parties contiguës doivent avoir des mouvements opposés, c'est-à-dire que l'une doit passer à droite de sa position primitive, tandis que l'autre passe à gauche et *vice versa*; ce qui ne pourrait avoir lieu si les parties étaient en nombre impair.

Dans le *système concentrique*, toutes les lignes nodales sont des circonférences dont le centre est au centre de la plaque.

Le cas le plus simple est celui d'une seule ligne nodale (Fig. 513); ensuite on peut en obtenir deux, trois ou davantage (Fig. 514 et 515). Pour reproduire ces figures plus facilement, M. Savart prend comme Chladni des plaques d'un grand dia-

mètre, mais il les perce au centre d'un tron circulaire de quatre ou cinq millimètres de diamètre; dans ce tron, il fait passer une mèche de crin en guise d'archet (Fig. 508). La plaque doit être soutenue seulement par quelques points des lignes nodales que l'on veut produire.

Dans le système composé, les lignes nodales sont des diamètres plus ou moins courbés et des circonférences plus ou moins altérées dans leurs contours. Les figures 516 et 517 représentent quelques-unes des formes nombreuses auxquelles on peut arriver. Pour les obtenir il faut plus ou moins d'habileté, mais le principe consiste à presser avec les doigts ou on plusieurs des points par lesquels les lignes nodales doivent passer.

Dans les plaques éarrées, l'on peut distinguer aussi trois systèmes analogues aux précédents. Les fig. 519, 520 et 521, rentrent dans le système diamétral.

Les fig. 522, 523 et 524 rentrent dans le système concentrique.

Les fig. 525, 526 et 527 forment une espèce de système composé.

Les plaques triangulaires, rectangulaires ou polygonales, donnent encore des formes analogues, ainsi que les plaques elliptiques.

Ces figures sont, en général, indépendantes de la nature des substances; elles se produisent avec la même régularité sur le métal, la verre ou le bois; mais il y a cependant une condition comme nous le verrons plus loin, c'est que l'élasticité soit la même dans tous les sens.

Les membranes présentent des modes de vibration tout-à-fait analogues à ceux des plaques : on peut s'en assurer avec du papier ou du parchemin, ou, ce qui vaut mieux encore, avec de la banderole très souple et très égale. Seulement, il faut employer un moyen particulier pour tendre et pour ébranler ces espèces de plaques trop minces pour se soutenir d'elles-mêmes. M. Savart, qui a fait une étude particulière de ces phénomènes, fixe les membranes par leurs bords, en les collant sur des cadres en bois ou sur l'ouverture d'une cloche de verre; il les humecte plus ou moins pour leur donner des tensions plus ou moins grandes; ensuite, pour les ébranler, il en approche à quelque distance un timbre vibrant, ou un tuyau d'orgue dont le son est plein et soutenu. Dès que le son se fait entendre, la membrane vibre comme si elle était directement ébranlée. Les grains de sable qui la recouvrent sautillent sur sa surface et s'accumulent sur les points de repos pour y dessiner les lignes nodales. Les figures que l'on obtient sont extrêmement variées; elles dépendent de la tension de la membrane et de l'acuité du son qui la frappe.

M. Savart a essayé d'analyser la série des figures que peut donner une même membrane ébranlée comme nous venons de le dire : et nous ne pouvons mieux faire que de rapporter ici les observations

qu'il a faites sur ce sujet intéressant (*Ann. de phys. et de chim.* t. 32, pag. 386).

« Pour plus de simplicité, je supposerais toujours qu'on ait d'abord obtenu une figure composée de lignes nodales rectilignes qui se coupent rectangulairement, et j'examinerai par quel chemin cette figure peut passer à une autre, composée simplement de lignes parallèles.

« Par exemple, je suppose qu'on soit parvenu à produire le mode de division représenté par le n° 1 de la fig. 492; si la tension de la membrane est constante et que le son devienne un peu plus aigu, il pourra arriver que les angles opposés au sommet en aa' , bb' , cc' , dd' , se désunissent comme dans le n° 2, qui prendra peu à peu l'aspect des n° 3, 4 et 5, si le son monte toujours, et ensuite celui du n° 6, composé seulement de 4 lignes parallèles; mais ce moyen de passer du premier mode de division à celui du n° 6, par cette première espèce de séparation des angles, n'est pas le seul que puisse employer la membrane; les fig. 493, 494 présentent des exemples de transformations différentes par lesquelles elle peut encore parvenir au même but de 4 lignes parallèles. Il peut aussi arriver, fig. 495, que les angles opposés en aa' , bb' , cc' , dd' , soient ceux qui se divisent d'abord, et que la figure tracée par le sable prenne successivement l'aspect des n° 2, 3, 4, 5 et 6; ou bien que cette division ait lieu comme dans le n° 2 des fig. 496 et 497, ce qui produira encore de nouvelles modifications dans les figures successives qui conduiront à 4 lignes parallèles. Enfin il pourra même se faire que les angles opposés ne se divisent pas comme dans le n° 2 de la fig. 498, qui passe au n° 6, par de simples inflexions des lignes droites en sens contraire.

« Maintenant 4 lignes parallèles peuvent passer à d'autres nombres de lignes parallèles ou dirigées rectangulairement : la fig. 499 présente une transformation de ce mode de division à deux lignes nodales parallèles, et la fig. 500, un passage du même mode de division à 4 lignes également parallèles, mais coupées rectangulairement par deux autres droites.

« En général quand on part d'une figure composée de lignes qui se coupent rectangulairement, le caractère des modifications successives dépend de la manière dont les angles opposés au sommet se désunissent : c'est ce qu'on peut voir d'une manière fort nette dans les fig. 501 et 502 qui sont des passages de 4 lignes parallèles. Au contraire, si l'on part des lignes parallèles, on peut dire en général que le caractère des modifications dépend des inflexions diverses que ces lignes peuvent affecter : c'est ainsi que, dans les mêmes fig. 501 et 502, les n° 5, considérés comme première modification des lignes droites, doivent produire des phénomènes tout différents, dépendant de ce que dans l'un les lignes se courbent d'abord en dehors, tandis que dans l'autre elles se courbent en dedans.

Mais, de toutes les modifications auxquelles les lignes droites peuvent donner naissance, il n'en est point qui offrent des phénomènes plus singuliers que ceux qui résultent des inflexions alternatives que ces lignes peuvent d'abord prendre, selon qu'il se présente deux courbures dans un sens et une dans l'autre, ou trois dans un sens et deux dans l'autre, etc., etc. On en voit des exemples remarquables (Fig. 503 et 504).

« Il résulte donc de ces observations, non-seulement que les membranes carrées sont susceptibles de produire tous les nombres possibles de vibration, et que pour chacun de ces nombres elles se divisent d'une manière particulière, mais encore qu'un même nombre de vibration peut être donné par plusieurs modes de division. Quant aux membranes dont les contours sont différens, circulaires, triangulaires, etc., elles présentent des phénomènes analogues quoique plus compliqués. C'est ainsi, par exemple, que, dans une membrane circulaire, trois lignes diamétrales peuvent passer graduellement à trois lignes parallèles et ensuite à une seule diamétrale accompagnée d'une ligne circulaire, (Fig. 540 à 545); que cinq diamétrales peuvent passer à 5 lignes parallèles (Fig. 537 à 539) et de là à d'autres modes de division, par exemple, à deux lignes circulaires divisées par une seule diamétrale.

« Les transformations successives des lignes nodales sont beaucoup plus difficiles à observer sur les lames rigides que sur les membranes, parce que, comme on ne peut produire des modes de division donné qu'en rendant immobiles plusieurs points de la surface de ces corps, il arrive presque toujours que ces points appartiennent en même temps à un ou plusieurs autres systèmes de lignes nodales, de sorte qu'on tombe souvent d'un son très grave à un son très aigu et réciproquement, sans pouvoir passer par les intermédiaires. »

Après avoir constaté par l'expérience cette excessive mobilité des membranes et la facilité avec laquelle elles peuvent passer d'un mode de vibration à un autre, M. Savart a été conduit à supposer que dans les vibrations des plaques, il pourrait bien y avoir divers modes de mouvements superposés comme dans les membranes et les cordes, et cette supposition est devenue entre ses mains habiles une vérité importante pour la théorie de l'acoustique. Voici l'extrait de son mémoire sur ce sujet. (*Ann. de phys. et de chim.*, t. 36, pag. 191.)

« Je suppose maintenant qu'on fasse résonner une lame circulaire dont le centre soit immobile, et qu'elle présente le mode de division composé de deux lignes nodales diamétrales, qui se coupent rectangulairement; dans ce cas, les parties les plus fines de la poussière se réunissent sur le milieu de chacune des quatre parties vibrantes, et elles y forment un petit amas animé de divers mouvemens; si l'on remarque ces quatre points, et qu'on cherche ensuite à produire la figure qui est composée de

deux lignes diamétrales et d'une ligne circulaire, on trouve que cette dernière ligne passe justement par les quatre points qu'on avait marqués sur la lame. Si ensuite l'on produit le mode de division composé de trois lignes nodales diamétrales, ce qui donne six parties vibrantes qui présentent chacune un point formé par la poussière fine, on observe de même qu'en ébranlant ensuite la lame de manière à obtenir la figure où il y a aussi trois lignes diamétrales, mais coupées par une ligne circulaire, cette dernière ligne passe toujours par les points où s'étaient réunies les parcelles de poussière fine à l'occasion du mode de division précédent. La même épreuve étant faite lorsque la lame présente quatre, six, huit, dix lignes nodales diamétrales, on reconnaît de même qu'elle est le siège d'un mode de division que j'appellerai secondaire, et qui se compose du même nombre de lignes diamétrales que le mode principal, et de plus d'une ligne nodale circulaire. Lorsque la figure principale est formée par un grand nombre de lignes diamétrales, comme les amplitudes des oscillations sont peu considérables, la ligne circulaire de la figure secondaire se trace presque entièrement, de sorte qu'on ne peut pas douter que les petits amas de poussière fine, qui se présentent à l'observation lorsque le nombre des diamètres est très petit, ne soient les rudimens d'une ligne nodale circulaire; et si l'on pouvait avoir quelques doutes à ce sujet, il suffirait, pour les lever, de remarquer que ces petits amas s'allongent d'autant plus que le diamètre des lames devient plus petit, l'épaisseur et le mode de division demeurant d'ailleurs les mêmes, de sorte que, passé un certain terme, la ligne circulaire se trace presque entièrement; ce qui indique que, si dans les lames très grandes elle se réduit à des points placés sur le milieu de chaque ventre de vibration de la figure principale, c'est que l'amplitude des oscillations étant très grande, le milieu de chacun de ces ventres est le seul endroit où la lame reste presque plane et horizontale, où par conséquent la poussière peut se réunir, tandis qu'à droite et à gauche de ce point la surface étant inclinée, les parcelles de poussière ne peuvent pas s'y arrêter.

« Ainsi qu'il était naturel de le présumer, les lignes nodales diamétrales de la figure secondaire sont placées dans les mêmes lieux que celles de la figure principale; c'est ce qu'on peut prouver facilement en plaçant une lame circulaire dans une pince armée de deux mâchoires de bois minces et assez longues pour qu'elles puissent serrer dans toute sa longueur l'une des diamétrales de la lame, disposition qui n'empêche pas les vibrations de se produire comme à l'ordinaire. On reconnaît, par ce procédé, que la figure secondaire se prononce aussi nettement que si la lame n'était fixée qu'à son centre, d'où il faut conclure que ce n'est pas le milieu d'un ventre de vibration du mode secondaire de division qui correspond à chaque ligne nodale de la figure principale, mais que les diamétrales

nodales des deux mouvements se superposent essentiellement. D'après cela il ne paraît pas douteux que, dans le cas des lignes circulaires seules, il y a des lignes secondaires qui occupent le même lieu que les lignes nodales principales; ce qu'on peut d'ailleurs prouver directement, en observant que ces dernières lignes peuvent aussi être touchées avec les doigts, et même pincées, en quelque point de leur étendue, entre les mâchoires d'un étau, sans que le mouvement secondaire cesse de se produire.

» Cette coexistence de deux modes de division s'observe non-seulement quand la figure principale ne présente que des lignes nodales diamétrales, mais encore quand les lignes de cette espèce seront coupées par un plus ou moins grand nombre de lignes circulaires. Dans tous ces différents cas, la figure secondaire se compose toujours du même nombre de diamétrales que la figure principale, et le nombre des lignes circulaires étant représenté par n , celui des lignes circulaires secondaires l'est par $2n + 1$, en admettant qu'outre les lignes secondaires apparentes, il y en a encore autant que de principales, et qui sont cachées par elles, ainsi que cela a lieu pour les lignes nodales diamétrales. En admettant aussi cette superposition pour le cas des lignes circulaires seules, et en considérant le point formé par la poussière, au centre des disques comme un cercle d'un diamètre infiniment petit, on peut dire encore que dans ce cas le nombre des lignes principales étant n , celui des lignes secondaires est $2n + 1$.

» D'après ce qui précède, il est donc évident que dans les lames circulaires il y a toujours un mode secondaire de division qui se prononce beaucoup mieux que tous les autres. Mais quelles sont les conditions qui rendent ainsi le mode secondaire tellement dépendant du mode principal, que celui-ci étant donné, on peut toujours prévoir celui-là? La solution de cette question paraît assez simple; en effet, parmi tous les modes de division qui existent avec le mode principal (et sans doute qu'il y en a un très grand nombre), ceux qui ont le plus d'analogie avec lui, qui approchent le plus d'être composés du même système de lignes de repos, doivent se prononcer plus fortement que les autres; et, de tous ceux qui pourront remplir cette condition, celui qui sera le plus simple, sera aussi celui dont les parties vibrantes feront les plus grandes excursions. Ainsi, par exemple, dans le cas de deux lignes diamétrales qui se coupent rectangulairement, de toutes les figures secondaires composées d'abord de deux lignes rectangulaires, la plus simple, celle qui approche le plus d'être réduite à ces deux lignes, c'est celle qui s'accompagne d'une seule ligne circulaire; c'est aussi cette figure qui existe toujours avec le mode de division dont nous venons de parler. Il résulte de là, ce qui est d'ailleurs conforme à l'observation, que la figure secondaire doit être composée de parties

vibrantes plus petites que celles de la figure principale, et que les sons secondaires doivent toujours être plus aigus que les sons principaux.

» Mais maintenant, pourquoi le mode de division secondaire ne peut-il être marqué que par une poussière plus fine que celle qui trace la figure principale, comme s'il y avait une certaine liaison entre les amplitudes des excursions des parties vibrantes, et le degré de ténuité des parcelles de poussière qui peuvent dessiner les lignes nodales? D'abord, je remarquerai que quelle que soit la poussière qu'on emploie, elle peut toujours se rassembler sur les lignes de repos du mode principal de division, et que c'est seulement la figure secondaire qui ne peut être indiquée que par une poussière très fine. Or, si l'on fait attention à la différence qu'il y a entre du sable, qui est un assemblage de petits globules indépendants les uns des autres, et une poussière très ténue, comme du lycopode, par exemple, ou même comme la poussière qui se dépose sur les meubles, dont toutes les parties contractent entre elles, et avec la surface de la lame, une certaine adhérence, on concevra facilement que ces substances, d'ailleurs si déliées, étant placées sur le milieu d'une partie vibrante du mode principal de division, peuvent, sans se désunir, être transportées avec la partie de la lame sur laquelle elles reposent, surtout si elles se trouvent placées sur une ligne nodale du mouvement secondaire, c'est-à-dire, entre deux portions de disque qui oscillent en sens contraire.

» Pour pouvoir répéter les expériences dont je viens de parler, il faut employer des disques de laiton de plusieurs décimètres de diamètre et de deux ou trois millimètres d'épaisseur; il est indispensable qu'ils soient bien plans, d'égal épaisseur partout; et, pour qu'ils ne présentent point d'inégalité, de densité, ni de rigidité, il est nécessaire de les faire recuire avant de les battre, et de n'employer pour cela qu'un marteau du bois un peu lourd. Ils seront toujours assez raides et assez sonores lorsqu'ils seront bien plans.

M. Savart a fait aussi une remarque curieuse sur le déplacement des lignes nodales: il a reconnu que, sous certaines conditions, elles peuvent osciller, ou même éprouver un mouvement de rotation plus ou moins rapide. Voici un extrait détaillé du mémoire qu'il a publié sur ce sujet. (*Ann. de phys. et de chim.*, t. 36, pag. 357.)

« Le nombre et la disposition des parties vibrantes d'un corps dépendent du lieu de l'ébranlement, de la forme même du corps, de sa nature, de ses dimensions et de la position des points de son étendue qu'on a préalablement rendus immobiles.

» Dans certains cas, on ne peut changer aucune de ces conditions sans que l'arrangement des parties vibrantes soit altéré, et dans d'autres, au contraire, le même arrangement peut avoir lieu quand même une ou plusieurs de ces circonstances viennent à varier. C'est ainsi, par exemple, que, quand

on promène un doigt mouillé sur le bord d'une cloche d'harmonica, elle ne laisse pas de se diviser de la même manière et de faire entendre le même son, quoique le lieu de l'ébranlement varie continuellement. Il en est de même d'une lame circulaire dont le centre est immobile; on peut ébranler un point quelconque de sa circonférence, sans que le mode de division subisse aucun changement : seulement la position des parties vibrantes varie, parce que le lieu de l'ébranlement doit toujours être le milieu d'une de ces parties, de sorte que, si l'archet, en même temps qu'il est animé d'un mouvement de va et vient, tournait tout autour de la lame d'un mouvement uniforme, en restant parallèle à lui-même, les parties vibrantes se déplaceraient en même temps et elles le suivraient en devenant le siège d'un mouvement de rotation continu. Mais ce qui est bien remarquable, ce mouvement de rotation du système des parties vibrantes peut s'établir, quoique le lieu de l'ébranlement demeure le même, et il semble que pour cela il suffise d'abandonner la lame à elle-même après qu'elle a été mise en vibration.

« Je suppose, par exemple, qu'on ait une lame circulaire fixée par son centre, et qu'elle présente l'un des modes de division qui ne sont composés que de lignes nodales diamétrales, l'expérience montre que ces lignes demeurent parfaitement immobiles, tant que l'archet touche le disque; mais s'il vient à le quitter subitement, ce qui n'empêche pas le mouvement de subsister encore pendant plusieurs secondes, les lignes de repos oscillent autour de la position qu'elles occupaient d'abord, et elles n'y reviennent que quand le mouvement de vibration est sur le point de cesser. Lorsque le nombre de ces oscillations est assez grand dans un temps très court, le sable devient un moyen insuffisant pour constater la position variable des lignes nodales, parce qu'il est alors chassé avec trop de violence pour fournir des indications bien nettes; mais on peut lui substituer une poussière fine susceptible d'adhérer légèrement à la surface de la lame et par conséquent de dessiner le mode secondaire de division : les petits amas qu'elle forme, au milieu de chaque partie vibrante principale, sur la trace de la ligne circulaire secondaire, peuvent être entraînés le long de cette ligne sans se désunir, à cause de l'adhérence que contractent entre elles les parties qui les composent, et ils indiquent parfaitement la position variable des ventres de vibration et par conséquent celle des lignes nodales principales. L'amplitude de ces oscillations est d'autant plus considérable qu'on promène l'archet avec plus de vitesse, et qu'on le sépare plus vivement de la lame vibrante, de sorte qu'il peut arriver que l'oscillation soit assez grande pour que les lignes nodales, entraînées au-delà du milieu de l'intervalle qui les séparait dans leur première position, soient transportées dans le même sens, jusqu'à ce qu'elles aient parcouru

toute l'étendue d'une partie vibrante entière. On conçoit que, parvenues dans cette nouvelle position, elles ne peuvent pas s'y arrêter subitement et qu'elles doivent osciller de nouveau, c'est aussi ce qui a lieu. Tandis que ces nouvelles oscillations s'exécutent, si l'on vient à donner un second coup d'archet, en ébranlant toujours la lame par le même point de sa circonférence, on déterminera les lignes nodales à faire un nouveau pas; et si les coups d'archet se suivent à des intervalles réglés, on verra les petits amas de poussière passer successivement par tous les ventres de vibration, s'y arrêter un instant, pour se porter ensuite sur la partie vibrante voisine; mais si l'on multiplie vivement les coups d'archet, le milieu de chaque ventre de vibration cesse d'être indiqué par la stagnation momentanée de la poussière, et le système des parties vibrantes devient le siège d'un mouvement de rotation qui est indiqué par un courant continu de poussière, ressemblant à un petit nuage affectant la forme d'un anneau (Figure 518). Le sens de ce mouvement est subordonné à des circonstances que je n'ai pas pu saisir; tantôt les ondulations des parties vibrantes se propagent de droite à gauche, tantôt de gauche à droite. Seulement j'ai remarqué que, pour l'entretenir, lorsqu'il était une fois produit, il ne fallait pas remonter l'archet en touchant exactement le même point de la circonférence de la lame contre lequel il frottait en descendant, et qu'il fallait le reporter un peu à droite ou un peu à gauche, en le ramenant ensuite à sa première position lorsqu'on le faisait redescendre.

« Quant à la position même que le courant occupe, elle dépend de celle de la ligne circulaire secondaire sur laquelle la poussière tend à se réunir : ainsi, plus le nombre des diamètres augmentera, plus le courant se rapprochera du bord de la lame.

« Il ne paraît pas que le nombre plus ou moins considérable des parties vibrantes influe sur la facilité avec laquelle le mouvement d'oscillation ou de rotation peut s'établir : on l'observe lorsque la circonférence de la lame se divise en quarante ou cinquante parties vibrantes, de même que quand elle ne se partage qu'en un bien moindre nombre. Il se produit aussi facilement dans les lames d'un petit diamètre que dans celles qui ont de grandes dimensions. Il peut aussi exister lorsque le mode de division se compose de lignes diamétrales coupées par une ou plusieurs lignes circulaires; mais alors les lignes de cette dernière espèce restent fixes, et il peut arriver que ces parties vibrantes qui sont en dedans d'une ligne circulaire affectent un mouvement de rotation, tandis que celles qui sont en dehors restent immobiles : le contraire peut aussi avoir lieu, et il peut également se faire qu'elles tournent toutes à la fois, mais toujours dans le même sens. Dans ce dernier cas, la poussière forme autant de courants qu'il y a de lignes

circulaires apparentes dans le mode secondaire de division; et tous les courans sont animés de vitesses différentes, ceux qui sont les plus voisins du centre de la lame se mouvant beaucoup plus rapidement que les autres.

La condition essentielle de la production de ce mouvement consistant en ce que les parties vibrantes puissent se déplacer sans qu'il y ait altération dans le nombre des vibrations, on conçoit qu'on ne pourra l'exciter dans les lames circulaires que lorsqu'elles présenteront des lignes nodales diamétrales, soit seules, soit coupées par des lignes circulaires; et il est clair qu'il deviendra tout-à-fait impossible pour les lames carrées, triangulaires, etc., dont les parties vibrantes ne peuvent pas changer de place sans qu'il survienne aussi un changement dans le nombre des vibrations; mais on pourra l'exciter dans les annexes et les timbres, ainsi que dans les cloches proprement dites, parce que ces divers corps peuvent produire le même mode de division, et par conséquent le même nombre de vibrations, quel que soit le point de leur contour qu'on choisisse pour le lieu de l'ébranlement. Les membranes circulaires en sont également susceptibles, même quand elles sont ébranlées par communication, et que le corps sonore d'où partent les ondes excitées dans l'air, reste dans la même position. Pour parvenir à faire cette dernière expérience il faut remarquer qu'une membrane qui vibre par communication peut, lorsqu'on l'ébranle de très près, non-seulement renforcer le son du corps qui la met en jeu, mais encore produire un son distinct de celui du corps qui lui communique le mouvement, quoique les sons des deux corps demeurent toujours à l'unisson: c'est dans ce dernier cas qu'une membrane devient très facilement le siège du mouvement de rotation des parties vibrantes. La poussière qu'on y répand, animée du mouvement tangentiel, forme alors des espèces de courans qui circulent avec beaucoup de vitesse et quelquefois dans des sens très divers, mais seulement quand la tension de la membrane est inégale.

Lorsque le changement de position des parties vibrantes est borné à de simples oscillations, l'oreille est avertie de leur existence par des alternatives dans l'intensité du son. Ces alternatives ont été remarquées depuis long-temps dans les timbres et particulièrement dans les cloches, mais sans qu'on sût à quoi les attribuer. On peut se convaincre qu'elles dépendent des oscillations des parties vibrantes en versant un peu d'eau dans un timbre qu'on ébranle avec un archet: on remarque que les rides formées à la surface de ce liquide, vis-à-vis chaque ventre de vibration, sont le siège d'oscillations qui coïncident avec les alternatives d'intensité du son, et que le plus grand renforcement a lieu lorsque les parties vibrantes atteignent la limite de leur excursion dans un sens, tandis que la moindre intensité a lieu lorsqu'elles attein-

gnent la limite opposée. Relativement à l'organe de l'ouïe, l'effet est le même que si les parties vibrantes restaient immobiles par rapport au corps sonore, et que ce corps produisit lui-même des oscillations autour d'un point fixe. Quand le mouvement de rotation s'établit, les alternatives d'intensité disparaissent complètement et alors le son revêt un caractère particulier, sans qu'on puisse apprécier si l'est plus intense que quand les parties vibrantes sont fixes: j'ai seulement eu remarquer qu'il était moins pur. Mais ce qui n'est pas douteux, c'est qu'il devient plus aigu et d'autant plus que le système des parties vibrantes tourne plus rapidement: quand le nombre des vibrations est considérable et que le corps a de grandes dimensions, le son peut s'élever presque d'un ton.

457. *Vibrations des corps qui n'ont pas la même élasticité dans tous les sens.*

Chladni avait reconnu dès ses premières expériences, que, sur les plaques de bois, l'inégale élasticité dans les différentes directions empêche les lignes nodales diamétrales de se déplacer et de tourner autour du centre dans tous les sens, comme sur les plaques de verre ou de métal. Cette remarque frappante n'avait pas été développée, et M. Savart l'a prise comme point de départ pour un nouveau travail sur lequel il vient de publier deux mémoires. (*Ann. de phys. et de Chim.*, t. 40, pag. 5 et 113.)

Si l'inégale élasticité est la seule cause qui empêche les lignes nodales diamétrales de se déplacer autour du centre, il est évident que la réciproque sera vraie, c'est-à-dire que si l'on voit un même système de lignes nodales affecter sur une plaque des positions déterminées, on en pourra conclure que cette plaque n'a plus la même élasticité dans tous les sens parallèlement à ses faces. Or, les substances cristallisées, telles que le cristal de roche, la chaux carbonatée, etc., n'offrant pas comme le bois les traces visibles de l'arrangement des couches ou des lames qui les constituent, on conçoit qu'il devient possible de reconnaître si leur élasticité est la même dans tous les sens; car il suffit pour cela de les tailler en plaques, de les faire vibrer, et d'observer si un même système de lignes nodales affecte de préférence certaines positions autour du centre.

M. Savart a fait d'abord sur ce sujet les expériences suivantes:

Il a remarqué que si l'on fait vibrer une plaque elliptique homogène, de verre ou de métal, (*Fig. 528*), le système de deux lignes nodales perpendiculaires se place inévitablement suivant les directions du grand axe $A A'$ et du petit axe $B B'$, et que si l'on veut à toute force déplacer ce système en ébranlant l'une des extrémités de ces axes, il se déplace en effet, mais non pas sans s'altérer, car il se change en une espèce d'hyperbole $n n'$ et

r' dont le premier axe est dirigé suivant le grand axe de l'ellipse; alors le son est plus grave.

Il faut un plus grand effort pour plier l'ellipse suivant a' que suivant a , ainsi le premier axe de l'hyperbole est dirigé suivant la plus grande résistance à la flexion.

Une plaque circulaire de laiton présente des phénomènes analogues lorsqu'on a diminué son élasticité dans un sens par plusieurs traits de scie parallèles qui ont enlevé seulement une partie de son épaisseur. Dans cet état, le système des deux lignes diamétrales perpendiculaires ne peut plus tourner autour de son centre; l'une des lignes qui le composent reste fixée dans la direction parallèle aux traits de scie et l'autre perpendiculairement. Mais si l'on ébranle ces points, il se déforme et devient une hyperbole dont le premier axe est encore dirigé suivant le plus grande résistance à la flexion.

Pour étudier ensuite les phénomènes qui présentent les plaques dont l'élasticité varie graduellement dans des sens perpendiculaires, on dans des sens différents, M. Savart a taillé un grand nombre de plaques circulaires de bois ayant leurs faces parallèles plus ou moins inclinées soit au plan des fibres, soit aux fibres elles-mêmes. Supposons par exemple que $c'c'$ (Fig. 529) représente un cube de bois de hêtre, dont la surface r soit parallèle au plan des fibres, la face r perpendiculaire à leur tranche, et la face s perpendiculaire à leur bout. Si l'on a plusieurs cubes pareils, tirés de la même pièce de hêtre, tous sans défaut, et parfaitement homogènes entre eux, on en pourra tirer des plaques du même épaisseur et du même rayon, qu'il sera permis ensuite de comparer comme si elles sortaient du même cube. Les unes seront coupées perpendiculairement à la face r , dans les directions rm , rn , rs et dans les directions intermédiaires; les autres perpendiculairement à la face r , aussi dans les directions rm , rn , rs , etc.; les autres enfin perpendiculairement à la face s , et aussi suivant les directions sm' , sn' , sv , etc. En faisant vibrer toutes ces lames, mais seulement pour obtenir le système des lignes nodales diamétrales perpendiculaires, ou le système des deux branches hyperboliques, M. Savart a trouvé des rapports remarquables entre les positions de ces systèmes et les directions des différents axes d'élasticité du bois de hêtre. Il a reconnu que les nombres de vibrations ne sont liés qu'indirectement avec les modes de division, car deux figures nodales semblables peuvent résulter de sons différents, et réciproquement un même son peut résulter de deux figures nodales différentes. Enfin dans ces plaques hétérogènes, tous les modes de division sont doubles, c'est-à-dire que chaque mode de division, considéré en particulier, peut toujours, en subissant toutefois des altérations plus ou moins considérables, s'établir en deux positions déterminées.

En faisant vibrer trois petites verges prismatiques à bases carrées, qui avaient été taillées dans des cubes pareils aux précédents et suivant les directions uc' , ur et ua , M. Savart a déduit des sons donnés par ces verges le rapport des résistances que le bois de hêtre oppose à la flexion dans ces trois sens rectangulaires. Il trouve qu'en représentant par l'unité la résistance à la flexion suivant a et c' , cette résistance est 2,25 suivant a , et 16 suivant ur .

M. Savart a soumis le cristal de roche à des recherches analogues. On sait que cette substance se présente assez ordinairement dans la nature sous la forme d'un prisme hexaèdre terminé par deux pyramides (Fig. 530). La ligne ss' qui joint les deux sommets de la pyramide est l'axe du cristal. Or, dans les plaques perpendiculaires à cet axe, le système des deux lignes nodales diamétrales perpendiculaires pouvant, en général, tourner autour du centre, sans altération sensible, il en résulte que l'élasticité est à peu près la même suivant tous les rayons.

Les plaques taillées parallèlement à l'axe n'ont pas toutes la même élasticité : celles qui passent par l'axe et par un des rayons de la coupe asc et az du prisme (Fig. 531), donnent les lignes nodales perpendiculaires, ou le système hyperbolique, tandis que celles qui passent par l'axe et par l'apothème or de la section précédente ne peuvent offrir que deux systèmes hyperboliques à peu près semblables, mais correspondant néanmoins à des sons différents. Les axes de ces hyperboles semblent faire entre eux un angle de 51 et 52°.

D'autres plaques taillées dans des directions différentes donnent encore des résultats différents, et M. Savart est porté à conclure de l'ensemble de ses expériences que le cristal de roche paraît avoir trois systèmes d'élasticité, chacun représenté par trois lignes. Il essaie même par des considérations ingénieuses de déduire leurs directions; mais nous ne pouvons entrer ici ni dans tous ces détails, ni dans la discussion qui devrait les accompagner.

488. *Vibrations des corps dont aucune dimension n'est petite par rapport aux autres.* — Il résulte évidemment de tout ce qui précède que des masses solides quelconques peuvent entrer en vibration comme les verges, ou les lames, ou les membranes, et que pendant leurs mouvements elles se partagent en diverses parties vibrantes, séparées les unes des autres par des surfaces nodales plus ou moins irrégulières. Ainsi, lorsqu'un bloc de bois, de pierre ou de fer, retentit sous le choc du marteau, on peut suivre par la pensée les pressions qui se communiquent de proche en proche dans toutes les directions depuis la première molécule qui reçoit le coup, jusqu'aux molécules qui en sont les plus éloignées, et cette diffusion du mouvement se fait comme dans une colonne d'air, c'est-à-dire, par ondes condensées ou raréfiées; seulement les ondes sont d'autant plus courtes que l'élasticité de la

matière est plus grande. Mais pour ébranler des masses un peu considérables et en faire sortir des sons purs et soutenus, on éprouve toujours de grandes difficultés, et c'est sans doute pour cette raison que l'on n'a fait jusqu'à présent que très peu d'expériences sur ce sujet. Les masses de différentes substances et de différentes formes offriraient cependant des modes de division et des traces de lignes nodales qui seraient, sans doute, le moyen le plus efficace d'étudier leur structure intérieure et tous les accidents de leur élasticité.

489. *Des vibrations des corps dans différents milieux.* — Les corps peuvent vibrer dans les différents fluides élastiques, et même dans les différents liquides, comme ils vibrent dans l'air; mais on conçoit que l'inertie et la résistance du milieu ambiant doivent exercer une influence sur la rapidité des vibrations, et par conséquent sur leur nombre et sur le ton du son qui en résulte. Cette influence est d'autant plus grande que la masse fluide que le corps solide doit déplacer dans ses mouvements est elle-même plus considérable. Ainsi les vibrations perpendiculaires à la surface de jonction d'un solide et d'un liquide seront beaucoup plus modifiées que les vibrations tangentes à cette surface. M. Savart

a reconnu, par exemple, qu'un disque de verre, ébranlé par un petit tube fixé à son centre et perpendiculairement à sa surface, donne dans l'eau un son beaucoup plus grave que dans l'air; les lignes nodales concentriques que l'on observe alors ne restent pas non plus les mêmes : dans l'eau elles s'éloignent du centre. Ce phénomène, qui est très marqué lorsqu'on passe de l'air dans l'eau, doit se produire encore, mais avec moins d'intensité, lorsqu'on fait vibrer le même corps successivement dans des fluides élastiques différents par leur nature ou seulement par leur densité.

Les différences sont beaucoup moindres dans les vibrations tangentielles : ainsi une lame ou une verge qui vibre dans sa longueur rend sensiblement le même son, soit qu'elle se trouve plongée dans l'air, dans l'eau, ou même dans le mercure.

On conçoit que ce dernier mode de vibration est le seul qu'il soit permis d'employer pour comparer les différents fluides par rapport à la facilité avec laquelle ils transmettent les sons; car les sons résultants des vibrations normales étant différents dans les différents milieux, il n'y a plus aucun moyen exact de comparaison.

CHAPITRE IV.

DU MOUVEMENT DE VIBRATION DES MASSES FLUIDES.

490. *Divers moyens de faire vibrer les liquides.* — Quand deux corps solides choqués sous l'eau excitent un bruit qui retentit au loin, le liquide est ébranlé directement dans tous les points où il touche les surfaces des corps solides vibrans, et il est alors ébranlé, comme le sont les gaz par les frémissements d'une cloche. C'est encore par un choc direct que les vibrations normales des disques et les vibrations longitudinales des verges dont nous avons parlé précédemment peuvent ébranler l'eau, le mercure ou les autres liquides. Ainsi l'on pourrait penser que le choc des solides est indispensable pour faire vibrer les liquides. Mais le jeu de la sirène peut exciter dans l'eau et sans doute aussi dans tous les liquides des vibrations sonores qu'on ne peut attribuer à un autre origine. On en fait l'expérience de la manière suivante : v v' est un vase large et profond (Fig. 646) dans lequel on ajuste solidement une sirène en s ; le tuyau porte-vent r est fermé par un robinet a et devient ici un tuyau porte-liquide, car il communique à un tube en plomb r , rempli d'eau, qui descend d'un réservoir élevé de 12 ou 15 pieds. L'appareil étant ajusté, on met de l'eau dans le vase v jusqu'au-dessus du plateau mobile de la

sirène, on ouvre le robinet a , et à l'instant l'eau jaillit, le plateau tourne et l'on entend un son très distinct. On pourrait penser que le son se communique par les montans de l'instrument qui s'élèvent encore au-dessus du niveau, mais ces montans sont bientôt cachés eux-mêmes par l'eau qui arrive, et quand tout l'appareil est enfoncé sous l'eau de plusieurs ponce, le son se fait encore entendre, et il paraît même plus pur et mieux soutenu.

Le liquide poussé d'abord dans les ouvertures de la table et du plateau, puis arrêté, puis poussé et arrêté de nouveau, et ainsi de suite par de rapides alternatives, éprouve précisément ce que les gaz éprouvent dans les mêmes circonstances.

Il y a sans doute encore d'autres moyens d'exciter dans les liquides des vibrations sonores sans la percussion des solides : on sait, par exemple, qu'un courant d'étincelles électriques produit un bruit net et soutenu, au milieu d'une masse liquide, et probablement si l'on ajustait un appareil pour enflammer au milieu de l'eau, par l'électricité, de petites bulles du mélange détonant d'hydrogène et d'oxygène, qui se succéderaient rapidement, l'on produirait ainsi des bruits très intenses, sans em-

ployer d'autres solides que les deux bouts du fil mince qui apporteraient le fluide électrique; encore pourrait-on les remplacer par de petites colonnes de mercure, contenues dans des tubes de matière très peu élastique.

401. *Divers moyens d'exciter les vibrations sonores dans les gaz.* — Nous avons déjà vu comment des vibrations peuvent être excitées dans l'air par l'explosion d'une poudre fulminante, par la percussion d'une masse élastique, comme un timbre, une cloche ou un tamtam, et par les oscillations rapides des cordes, des verges ou des plaques. Nous avons aussi indiqué comment la lame mince d'air qui vient se briser contre le biseau du flageolet ou du tuyau d'orgue détermine une oscillation dans toute la colonne d'air adjacente, le changement de pression qui survient en un point de cette colonne élastique se communique rapidement dans toute son étendue, tous les ressorts moléculaires réagissent les uns sur les autres, et la colonne vibre dans son ensemble par la même raison qu'un cylindre solide vibre dans toute sa masse quand il est ébranlé dans un point quelconque.

C'est encore le même phénomène qui se produit dans la flûte et dans la toupie d'Allemagne, avec cette seule différence que dans le premier cas l'air est poussé contre le bord de l'ouverture, tandis que dans le second cas c'est l'ouverture elle-même qui est poussée contre l'air, par la rotation de l'instrument.

Dans les appeaux ou les réclames dont se servent les chasseurs pour imiter le cri des oiseaux (Fig. 535 et 536) le phénomène paraît un peu plus compliqué. Les vibrations sont encore produites par le courant d'air, mais ici le courant entraîne dans son mouvement une partie du fluide qui est contenu dans la cavité de l'appareil, et le fluide ainsi raréfié, n'étant plus capable de soutenir la pression atmosphérique, l'air extérieur rentre, et rentre en excès; alors, nouvelle raréfaction produite par l'entraînement du courant, et nouvelle rentrée déterminée par la pression extérieure, etc. Ainsi toute la masse d'air de la cavité, alternativement raréfiée et comprimée, accomplit des oscillations qui se communiquent au dehors.

C'est par un jeu semblable que M. Cagniard de la Tour explique les sons aigus et variés que l'on peut produire en soufflant avec la bouche. Les lèvres avancées et un peu pressées forment en quelque sorte la calotte du réclame (Fig. 535), et les vibrations sont produites, parce que l'air est alternativement raréfié par le courant et comprimé par la pression extérieure. On peut en effet produire les mêmes sons, à peu près, soit qu'on aspire l'air, soit qu'on le pousse dehors par un courant contraire; et M. Cagniard de la Tour est même parvenu à imiter très bien tous les tons du sifflet naturel en soufflant simplement dans un tube de verre dont l'une des extrémités est fermée en partie par un petit disque de liège au centre duquel on laisse une

ouverture circulaire (Fig. 536 bis). Le son est à peu près le même soit que l'on souffle en prenant dans la bouche l'une ou l'autre des extrémités. Seulement il faut de longs tâtonnements pour proportionner l'épaisseur du disque de liège à la largeur de l'ouverture dont il est percé à son centre.

La lampe à gaz hydrogène, que l'on appelle aussi *lampe philosophique*, détermine encore dans l'air un autre mode d'ébranlement. Cet appareil fut imaginé en Allemagne et ensuite étudié par Brugnattelli et Pietet; mais c'est, je crois, M. de La Rive, de Genève, qui a le premier analysé les phénomènes qu'il présente (*Journ. de physiq.*, t. 65, pag. 165). L'hydrogène étant allumé à l'extrémité du tube effilé de verre (Fig. 540), on approche un autre tube long et large à s dans la position marquée par la figure, et l'on entend un son très intense. La vapeur d'eau formée par la combustion se condense rapidement, et détermine ainsi à quelque distance de la flamme une raréfaction ou une espèce de vide dans lequel l'air environnant se précipite, et le même phénomène se répète avec une excessive rapidité, on conçoit qu'il en doive résulter un son dont l'intensité et la gravité dépendent du volume de la flamme et des dimensions du tuyau qui l'enveloppe. M. de La Rive a été conduit à cette explication en faisant bouillir de l'eau ou du mercure dans une boule de verre terminée par un tube de 2 ou 3 lignes de diamètre, et de 5 ou 6 pouces de longueur. Quand l'ébullition est vive la condensation de la vapeur dans le tube est accompagnée d'un son plus ou moins intense et plus ou moins soutenu. Ce phénomène et le précédent sont, en effet, dus à la même cause.

Enfin l'on peut dans une masse d'air déterminée exciter des sons *par communication*, c'est-à-dire, par le moyen d'un autre son qui est produit à quelque distance. Tout le monde sait que certains sons de la voix se renfient, et prennent beaucoup d'intensité lorsqu'on les forme devant un vase ouvert ayant une grandeur convenable. Alors l'air du vase vibre, et vibre à l'unisson avec la voix à laquelle il donne tant de force et d'éclat. Et comme une même masse d'air prend plusieurs modes de vibration, il suffira pour la faire vibrer par communication de produire à une petite distance l'un des sons qu'elle peut rendre. Mais pour donner à ce phénomène plus de régularité, M. Savart a imaginé d'ajuster ensemble deux tuyaux de 4 ou 5 pouces de diamètre et d'un pied de longueur qui glissent l'un sur l'autre comme des tuyaux de clochette; ils peuvent être tout-à-fait ouverts aux deux bouts, ou bien l'un ouvert et l'autre fermé. Par ce moyen on peut faire varier à volonté la colonne résonnante, et par conséquent la rendre propre à renforcer le son que l'on produit à son extrémité ouverte avec un timbre, une cloche, ou seulement une lame vibrante. Les sons résultants ont une force et une rondeur qui étonnent toujours quand on les entend pour la première fois. Un tuyau large et court a la

propriété remarquable de renforcer avec plus ou moins d'intensité des sons voisins assez différents les uns des autres, tandis qu'un tuyau long et étroit ne peut renforcer qu'un son déterminé et ses harmoniques, les sons un peu plus graves en un peu plus aigus ne lui communiquent aucune vibration sensible. Ce mode d'ébranlement de l'air dans les tuyaux ne présente pas les phénomènes compliqués qui se produisent dans le mode ordinaire à cause de l'influence de l'embouchure, et il peut être employé avec avantage pour plusieurs recherches importantes sur les vibrations des gaz.

402. *Des modifications que peut recevoir le son d'un tuyau par la direction du vent, la grandeur de l'embouchure et sa position.* — Il résulte des expériences de M. Savart que la direction du vent n'a aucune influence sur les sons que peuvent rendre les tuyaux prismatiques de différentes formes ou même les cavités sphériques. Dans un tuyau prismatique à base carrée, par exemple, l'embouchure ayant les mêmes dimensions, le son produit sera le même soit que l'on prenne pour biseau l'extrémité de l'une des parois latérales, ou l'un des bords de la base, et toutes les directions intermédiaires du vent donneront encore le même son.

La grandeur et la position de l'embouchure ont au contraire une grande influence. Nous avons déjà remarqué qu'en augmentant la largeur de l'embouchure, c'est-à-dire, la distance des deux lèvres, on donne au tuyau une tendance à produire le son fondamental, et qu'en la diminuant on est presque sûr de le faire octavier; mais la longueur de l'embouchure exerce une autre influence. Si l'on prend, par exemple, un tuyau prismatique carré, dont l'embouchure soit dans toute la longueur du côté de la base, on verra que le son devient plus grave quand l'embouchure devient plus courte, et qu'il peut aussi descendre d'une sixième ou même d'une septième, surtout si le tuyau est à peu près cubique. C'est sans doute pour obtenir un effet analogue que les facteurs d'orgues mettent aux deux coins de la bouche des tuyaux, de petites lames de plomb, qu'ils serrent on qu'ils écartent pour obtenir l'accord. Ces lames sont les *oreilles*, parce qu'elles sont là, disent-ils, pour écouter si le tayan est au ton.

La forme de l'embouchure restant la même, pour la largeur et la longueur, il est évident qu'on peut la placer en différents lieux sur les parois du tuyau, soit perpendiculairement, soit obliquement par rapport à son axe, et M. Savart a constaté que dans ces diverses positions elle fait rendre au tuyau des sons différents. C'est ce que l'on peut aussi vérifier avec une flûte en prenant pour embouchure l'un des trous du milieu.

403. *De l'influence des dimensions sur les vibrations des tuyaux.* — Nous avons vu que c'est la longueur seule des tuyaux ouverts ou fermés qui détermine le son qu'ils doivent rendre, pourvu que cette longueur soit très grande par rapport à la lar-

geur. Mais quand cette condition n'est pas remplie, la loi des vibrations est beaucoup plus compliquée. Voici les principaux résultats auxquels M. Savart a été conduit dans les recherches étendues qu'il a faites sur ce sujet.

1°. Des tuyaux prismatiques rectangulaires, ayant tous une embouchure de même longueur que l'un des côtés de leur base, produisent le même son quand les sections perpendiculaires à la ligne de l'embouchure ont la même surface, et quand en même temps les largeurs de ces sections sont au moins un sixième de leurs hauteurs.

2°. Quand cette dernière condition est seule remplie, les nombres de vibrations paraissent être entre eux comme les racines carrées des sections.

3°. Les nombres de vibrations des tuyaux semblables et semblablement embouchés sont entre eux comme les dimensions homologues de ces tuyaux.

Cette loi s'étend même aux cavités sphériques dont les embouchures sont placées sur de grands cercles et y occupent le même nombre de degrés.

404. *Les parois qui enveloppent une masse d'air ont une influence sur ses vibrations.* — L'on sait depuis long-temps, par des expériences souvent répétées, que le son du cor et de la trompette dépend de la matière de l'instrument et du degré d'écroutissage qu'elle a reçu. Un cor, par exemple, qui serait recuit en fer, sans être altéré dans sa forme, ne rendrait plus que des sons faux et étouffés. Les facteurs d'orgues connaissent aussi cette influence de la matière des tuyaux sur les qualités des sons, et ils assurent que, pour faire un mauvais instrument, il suffirait d'altérer très peu la nature de l'étain qu'ils emploient dans les jeux de métal, ou la nature du bois dans les jeux de bois. Ces observations sont pleinement confirmées par les nombreuses expériences que M. Savart a faites avec des tuyaux de parchemin plus ou moins tendu ou de papier plus ou moins humide. M. Savart a constaté 1° que dans un tuyau prismatique carré, ayant un pied de hauteur et neuf lignes de côté, le son peut baisser de plus d'une octave quand on humecte de plus en plus le papier qui ferme les parois, ce papier est collé sur les arêtes solides du prisme comme sur une espèce de cadre; 2° que le son peut par ce moyen s'abaisser d'autant plus que les tuyaux sont plus courts: ainsi il s'abaisse facilement de plus de deux octaves dans les tuyaux cubiques; 3° qu'il suffit même de faire en papier ou en parchemin une partie seulement de la paroi d'un tuyau pour en faire sensiblement baisser le ton. Nous nous contentons d'énoncer ici ces résultats, car il est facile de voir comment on peut les reproduire par l'expérience.

405. *De la réflexion du son et des échos.* — Lorsque les ondes sonores passent d'un milieu dans un autre, elles éprouvent toujours une réflexion partielle, et lorsqu'elles rencontrent un obstacle fixe elles éprouvent alors une réflexion totale.

Que la réflexion soit partielle ou totale, elle s'accomplit toujours dans une direction telle que l'angle de réflexion soit égal à l'angle d'incidence. Ces lois générales ne peuvent être démontrées que par les principes de la mécanique, et nous devons seulement essayer ici de les faire comprendre. Si ss' (Fig. 532), représente la surface de séparation de deux milieux comme l'air et l'eau, et qu'une ondulation sonore vienne, par exemple, tomber sur l'eau dans la direction ΔI , en faisant avec la perpendiculaire IP , un angle ΔIP , une partie du mouvement qui la constitue se communiquera à la masse d'eau, et l'autre partie se communiquera à l'air dans la direction IA , de manière que l'angle d'incidence ΔIP soit égal à l'angle de réflexion PIA . Ce phénomène se produirait encore suivant la même loi, si la surface ss' était la surface de jonction de deux gaz différents, ou deux portions d'un même gaz ayant des densités différentes, ou si elle était un plan solide de bois, de pierre ou de métal. Seulement dans ce dernier cas le son réfléchi suivant AI aurait beaucoup plus d'intensité. Ainsi un observateur qui serait placé quelque part sur cette ligne AI entendrait le son comme s'il était produit en I ou sur le prolongement de AI .

C'est sur ce principe général que repose l'explication des échos.

Quand un écho renvoie le son au point de départ, il est évident que les ondes sonores vont tomber perpendiculairement sur la surface réfléchissante, qui doit être en conséquence un plan ou une surface sphérique dont le centre est le point de départ lui-même. Dans ces circonstances un écho peut répéter un nombre de syllabes plus ou moins grand suivant des conditions faciles à déterminer. On sait, par exemple, qu'en articulant très vite on peut prononcer assez nettement 8 syllabes en 2^{es}, or, en 2^{es} le son parcourt deux fois 340 mètres; par conséquent si un écho se trouve à 340 mètres seulement, il renverra successivement dans leur ordre toutes les syllabes, et la première reviendra à l'observateur après 2^{es}, c'est-à-dire, à l'instant où la dernière sera prononcée. A cette distance un écho pourra donc répéter 7 ou 8 syllabes; on en cite qui répètent jusqu'à 14 ou 15 syllabes.

Il n'est nullement nécessaire que la surface réfléchissante soit dure et polie; car on observe souvent à la mer que les nuages forment écho, et l'on observe surtout que les voiles d'un bâtiment éloigné, lorsqu'elles sont bien tendues, forment des échos assez parfaits.

Les ondes sonores doivent aussi être réfléchies dans une atmosphère sans nuages, quand le soleil dans toute sa force répand une vive chaleur à la surface de la terre, car les divers points d'une plaine ou d'une colline ne peuvent être également échauffés; l'évaporation, les ombres et d'autres causes encore s'y opposent. Cette inégalité de température détermine une foule de courants chauds

ascendants et de courants froids descendants dont la densité n'est pas la même. Ainsi l'onde sonore se réfléchit en partie à chaque passage d'un courant dans l'autre, et si le son réfléchi n'est pas assez fort pour former écho, il atténue cependant le son direct d'une manière très sensible. C'est sans doute par cette raison, comme l'a fait remarquer M. de Humboldt, que le son se propage toujours à de plus grandes distances la nuit que le jour, même au milieu des forêts de l'Amérique, où les animaux, calmes et silencieux pendant le jour, troublent et agitent l'atmosphère de mille bruits confus pendant la nuit.

L'explication des échos multiples, c'est-à-dire, qui répètent plusieurs fois la même syllabe, repose encore sur les mêmes principes. Car un son réfléchi, ayant la propriété de se réfléchir de nouveau, il est évident que deux surfaces réfléchissantes pourront se renvoyer le son comme deux miroirs opposés se renvoient la lumière. Aussi c'est entre des tours, ou entre des murs parallèles et éloignés, que les échos multiples se font entendre. On citait autrefois un écho situé près de Verdun qui répétait 12 ou 13 fois le même mot; il était formé par deux tours éloignées seulement de 26 toises.

Enfin, il y a des échos qui font à peu près l'office de porte-voix. On les observe sous des voûtes plus ou moins hautes. Supposons que la section d'une voûte par un certain plan donne une ellipse $AA'A'$ (Fig. 533), dont les foyers soient en v et v' , un son formé en v ira par sa réflexion sur toute la courbe $AA'A'$ se concentrer en v' , car on sait que dans l'ellipse tous les rayons menés des points s et v' , au même point de la courbe, font des angles égaux avec cette courbe ou avec la tangente en ce point ou avec la normale. Ainsi les ondes sonores qui vont suivant sv , sv' , etc., se réfléchissent suivant $1v'$, $1'v'$, etc. Par conséquent deux personnes qui seraient placées l'une en v et l'autre en v' , pourraient s'entendre à la distance de 50 ou même de 100 pieds en parlant à voix très basse, sans qu'aucun mot pût être saisi par des auditeurs intermédiaires. Il y a au Conservatoire des arts et métiers une grande salle carrée qui présente ce phénomène à ses angles opposés.

496. Des surfaces nodales que l'on observe dans les grandes masses d'air qui sont en vibration. — Lorsqu'on produit un son très intense et soutenu dans une galerie ou seulement dans une chambre ordinaire, on observe que le même son n'a pas la même intensité dans toute l'étendue de l'enceinte. Dans certains points il est fort et assourdissant, dans d'autres il est très faible; ces derniers points sont comme des nœuds de vibration où l'air n'éprouve que de très petits déplacements. M. Savart a essayé de suivre la trace de ces lignes ou surfaces nodales, et nous indiquerons seulement le procédé dont il s'est servi, car il n'y a sur ce sujet aucun résultat simple et général.

Le son est produit avec un timbre et un tuyau renforçant, et on l'écoute aux différents points de l'enceinte avec une espèce d'oreille artificielle, qui se compose d'un cône évasé, d'un tube conique et d'une membrane.

cc' (Fig. 534) représente le cône, tt' le tuyau, et mm' la membrane; celle-ci doit être posée sur les bords du tube recourbé et ajustée pour recevoir divers degrés de tension. On place l'axe du cône dans la direction suivant laquelle on veut écouter, et l'on juge de l'intensité du son par les vibrations de la membrane, c'est-à-dire, par les mouvements

du sable dont on la recouvre à l'instant de l'expérience.

La grandeur de l'enceinte, sa forme et tous les accidents que présentent ses parois sont autant de causes qui font varier les formes et les positions des surfaces nodales, pour une même position du timbre. Quant à la cause elle-même qui détermine la formation des nœuds, c'est sans aucun doute la rencontre des ondes directes et des ondes réfléchies, mais jusqu'à présent il n'y a pas sur ce sujet des observations assez nombreuses et assez exactes, pour que l'on puisse essayer d'en présenter une théorie.

CHAPITRE V.

DES VIBRATIONS DE QUELQUES INSTRUMENTS DE MUSIQUE.

497. *Communication des vibrations sonores entre les solides et les fluides.* — Les liquides et les gaz ne reçoivent, en général, leur mouvement de vibration que par le choc direct des corps solides, ou au moins par l'intermédiaire de ces corps comme dans la sirène et les tuyaux. Mais dès qu'ils ont reçu ce mouvement, ils peuvent à leur tour le transmettre à tous les corps solides qu'ils rencontrent. C'est ainsi, par exemple, que l'on voit une corde d'instrument se mettre en vibration dès qu'elle entend le son qu'elle peut rendre ou l'un de ses harmoniques, et que des carreaux de vitres s'ébranlent et vibrent fortement sous l'influence de certains sons de la voix, comme sous l'influence du bruit du canon. Ce phénomène, qui se présente d'une manière frappante sur tous les corps solides très mobiles, se produit pareillement dans les corps plus inertes et moins élastiques, et il n'y a peut-être pas une cathédrale dont la grosse cloche ne fasse vibrer d'une manière sensible certains piliers ou certains massifs considérables. Il est permis de conclure ici de ce que l'on observe à ce que l'on n'observe pas, et puisqu'une masse solide quelconque peut entrer en vibration sous le choc du marteau et produire un son déterminé, on peut conclure qu'elle entrera en vibration plus ou moins marquée lorsque ce son en traversant l'eau ou l'air viendra la frapper. On peut même conclure qu'en général elle entrera en vibration pour tous les sons possibles, car en général il n'y a pas de son qu'elle ne puisse rendre, soit comme son fondamental, soit comme harmonique, si elle était convenablement ébranlée, et par conséquent il n'y a pas de son qui, en la frappant, ne détermine en elle un certain mode de vibration. Si l'on conservait quelque doute sur cette conclusion générale, il suffirait de remarquer que le son produit dans un fluide est

transmis avec plus ou moins de facilité par une masse solide quelconque, et que certainement il ne peut être transmis par elle sans l'avoir forcée à vibrer à l'unisson avec lui. Mais il serait curieux de savoir comment le mouvement se détermine suivant les diverses obliquités des surfaces par rapport à la direction de l'onde. Il n'y a sur ce sujet qu'un très petit nombre d'expériences : M. Savart a constaté, par exemple, qu'une membrane tendue sur un cadre ne vibre pas de la même manière quand on lui présente une plaque sonore, perpendiculairement ou parallèlement. Dans le premier cas ses vibrations sont tangentielles, et dans le second elles sont normales comme celles de la plaque.

Il est probable que les liquides sont plus efficaces que les gaz pour déterminer ainsi des vibrations dans les solides, et sans doute en disposant sous l'eau des corps de différentes formes l'on pourrait, au moyen du sable, reconnaître des vibrations que le même moyen ne rendrait pas sensibles dans l'air.

498. *Communication des vibrations dans les corps solides contigus.* — Puisque les vibrations se transmettent des fluides aux solides, elles doivent à plus forte raison se transmettre dans toute l'étendue d'un système solide dont les diverses parties sont juxtaposées et tellement contiguës qu'elles ne laissent entre elles aucune solution de continuité. Un pareil système ne forme plus qu'un tout, qui, dès qu'un point est ébranlé, se partage comme un seul corps, en parties vibrantes séparées par des lignes nodales; chacune des pièces perd en quelque sorte son individualité; sa liaison avec les pièces voisines l'empêche de vibrer comme elle ferait si elle était seule; à peu près comme une portion de plaque prend des modes de vibrations différents, si

elle est détachée et ébranlée à part ou si elle reste unie à la plaque entière.

M. Savart a fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet, il a varié les appareils de mille manières pour montrer le fait général de la communication du mouvement dans toutes les parties d'un système composé de lames, de plaques, de cloches, de cordes, etc.; mais, ce qui est plus important, il a constaté les différents sens des vibrations, et il a été ainsi conduit à ce résultat général, que, dans un système quelconque, toutes les molécules vibrantes ont des mouvements parallèles à l'ébranlement primitif. Par conséquent, si le mouvement est produit par un archet, toutes les molécules vibrent parallèlement à la ligne que parcourent les crins dont il se compose, et s'il est produit par un petit tube de verre fixé par une de ses extrémités en un point quelconque du système et ébranlé sur sa longueur par la friction des doigts ou d'un drap mouillé, toutes les molécules vibrent suivant des lignes parallèles à l'axe de ce tube.

400. *Des instruments à anches.* — Une anche est, en général, une lame vibrante, mise en mouvement par un courant d'air. Supposons, par exemple, que dans une plaque de zinc ou de cuivre $r' r'$ (Fig. 550) de 2 ou 3 millimètres d'épaisseur on fasse une ouverture rectangulaire $a b c d$, longue de 3 centimètres et large de 7 ou 8 millimètres seulement, et que l'on soude près de l'un de ses petits côtés une lame de cuivre $l l'$, très mince et très élastique, qui puisse vibrer dans cette ouverture en rasant les bords $a s$, $s c$ et $e d$. On aura ainsi la plus simple des anches, et pour la mettre en mouvement il suffira d'appuyer la plaque $r r'$, longitudinalement contre les lèvres et de souffler en dirigeant le vent vers l'extrémité libre de la lame $l l'$. L'air la met en vibration, et l'ouverture $a b c d$, étant ainsi alternativement ouverte et fermée, l'air passe et s'arrête par intermittences, de là des undulations sonores dont la longueur dépend du nombre des vibrations que la lame vibrante $l l'$ peut exécuter à raison de ses dimensions et de son élasticité. Le son est le même que si la lame vibrerait par écartement mécanique, mais il est incomparablement plus intense. En disposant sur la même plaque plusieurs lames qui donnent les sens de la gamme, on peut faire une espèce d'instrument propre à jouer des airs.

L'anche dont on se sert dans les jeux d'orgues repose sur le même principe, mais elle est autrement ajustée. On y distingue deux tuyaux mis bout à bout, r et r' (Fig. 547), un bouchon s qui les sépare, et l'anche a , proprement dite, qui traverse ce bouchon; on voit ces trois pièces séparées dans la Fig. 548. L'anche elle-même est représentée en détail dans la Fig. 551; elle se compose de trois pièces essentielles, la *rigole* s , la *languette* l et la *rasette* r .

La rigole est un tube de métal prismatique, ou demi-cylindrique, fermé au bout inférieur, ouvert

au bout supérieur, et percé latéralement d'une fenêtre qui établit la communication entre les deux tubes de part et d'autre du bouchon.

La languette est la lame vibrante; dans sa position naturelle elle ferme le fenteur on à peu près; c'est-à-dire qu'elle en rase les parois par ses trois bords libres pendant qu'elle accomplit ses battements. Son quatrième bord est solidement fixé sur la paroi du tube, soit avec des vis, soit au moyen d'une soudure.

La rasette est un fil de métal très ferme, doublement recourbé à sa partie inférieure par laquelle il appuie fortement sur toute la largeur de la languette, comme on le voit dans la Fig. 551. Elle glisse à frottement dans le bouchon; elle sert, comme on le voit, à changer la longueur vibrante de la languette, car, au-dessus de la rasette, rien ne peut vibrer.

Le vent du soufflet entre par le pied du tuyau r , presse la languette pour s'ouvrir un passage, traverse la rigole et sort par le tuyau r' . La languette ainsi écartée pour un instant est bientôt rappelée par son élasticité, et accomplit sous ces deux forces contraires des vibrations qui se répètent aussi longtemps que dure le courant d'air. La Fig. 547 représente un tuyau à anche qui est vitré vis-à-vis la languette pour que l'en puisse en observer le jeu. Le nombre des vibrations dépend surtout des dimensions de la languette et de sa rigidité; il est en général peu différent de ce qu'il serait si cette lame vibrerait à vide par un écartement mécanique. Mais l'ajustement des tuyaux donne au son un timbre et une intensité remarquables; ces deux qualités sont ici très intimement liées, cependant l'intensité dépend surtout de la vitesse du courant et le timbre de la forme des tuyaux. L'on conçoit en effet qu'un courant plus rapide détermine dans la languette des oscillations dont l'amplitude est plus grande, leur durée restant la même; ainsi l'intensité du son croît avec la vitesse du courant, à moins que cette vitesse ne soit assez grande pour fléchir la languette et y déterminer un nœud de vibration. L'on conçoit ensuite que la languette, les tuyaux et les masses d'air qu'ils contiennent forment un système vibrant dont toutes les parties donnent au son un timbre particulier. Une condition fondamentale pour que l'anche *parle bien* et rende un son plein et agréable, c'est que les masses d'air des tuyaux soient telles par leur forme et leur étendue qu'elles se mettent facilement à l'unisson avec la languette. Mais cette condition peut être remplie pour chacun d'eux d'une infinité de manières, et l'on a fait de nombreux essais pour produire par ce moyen des sens articulés imitant la voix humaine; on a donné au tuyau inférieur des formes anguleuses, rentrantes, ou diversement courbées; on a fait le tuyau supérieur, conique, évasé, renflé en son milieu; on y a tendu des membranes, et disposé des feuilles ou des lames de différentes substances; il n'y a pas une de ces me-

différences qui ne donne au son un timbre particulier, et l'en peut ajouter que plusieurs combinaisons de cette sorte, imaginées par M. Grenié, n'ont pas été sans succès pour faire sortir des tuyaux d'anches certains sons plus ou moins analogues aux sons des voyelles articulés par la voix humaine.

M. Grenié paraît être le premier qui ait donné aux anches leur perfection actuelle; autrefois la languette venait battre sur les herds de la fenêtre; elle était trop large pour passer alternativement en dedans et en dehors, et le son qu'elle donnait avait toujours quelque chose de la voix criarde du canard.

Les embouchures de basson, de hautbois et de clarinette ne sont autre chose que des anches diversement ajustées. Dans ces instruments c'est la pression des lèvres qui tient lieu de rasette.

500. *Des instruments à corde.* — Tous les instruments à cordes ont une caisse sonore, et tout le monde sait que la qualité du son dépend de la construction de la caisse. La corde, la caisse et l'air qu'elle contient, forment encore un système vibrant dont chaque partie imprime au son un timbre particulier. C'est la corde qui donne le ton, c'est-à-dire, que, dans le reste de l'instrument, toutes les pièces doivent se mettre à l'unisson avec elle, et pour cela se partager convenablement par des lignes modales.

Il est clair, en effet, que la liaison de la corde avec tout le système ne peut pas modifier le son qu'elle doit rendre d'après sa longueur et sa tension, car les points par lesquels elle touche les chevalets sont inévitablement des nœuds, et ces nœuds une fois déterminés le son en est une conséquence nécessaire. Il faut donc que la caisse soit d'une telle substance et d'une telle forme qu'elle puisse instantanément prendre l'unisson de toutes les cordes dans tous leurs tons, et il faut en outre qu'elle

puisse instantanément aussi imprimer ses vibrations à la masse d'air qu'elle contient, et par conséquent que cette masse d'air soit apte à les recevoir. Ces conditions multipliées font assez voir combien il est difficile de faire un bon instrument à cordes, et par exemple, un bon violon. Car en supposant que la matière de la caisse vibre parfaitement bien, il pourra se faire que par sa forme la masse d'air qu'elle enveloppe reçoive mal ses vibrations, et l'instrument sera mauvais. Un peu plus d'élasticité ou de rigidité dans le bois de la table supérieure, exigera sans doute une autre forme dans la caisse, et c'est pour cela que deux violons également parfaits ont cependant des formes sensiblement différentes, et que deux violons de même forme peuvent être, l'un très bon et l'autre fort médiocre.

Il suffit quelquefois d'un changement léger dans les pièces mobiles pour rendre un violon un peu meilleur ou un peu plus mauvais. Car les vibrations passent de la corde à la table supérieure par le *chevalet*, et de la table supérieure à la table inférieure au moyen de *l'âme*. La position absolue de ces pièces et leur position relative ne peut donc manquer d'avoir quelque influence sur la facilité avec laquelle le son passe de la corde à la caisse et de la caisse à la masse d'air. M. Savart a fait des expériences variées et intéressantes pour montrer aux yeux par le mouvement du sable la transmission des vibrations dans les diverses pièces du violon, et il est parvenu ainsi à indiquer les fonctions principales que chacune d'elles doit remplir. Cependant la pièce la plus simple doit satisfaire à tant de conditions différentes, qu'il est à peu près impossible d'en faire une analyse exacte, et sans doute si l'en venait la changer pour mieux l'approprier à tel ou tel tint, il est très probable qu'elle deviendrait moins apte pour tel ou tel autre et que l'on perdrait d'un côté au moins autant que l'on gagnerait de l'autre.

CHAPITRE VI.

DE LA VITESSE DU SON DANS LES DIFFÉRENTS MILIEUX.

501. *Vitesse du son dans les fluides élastiques.* — Newton avait donné une expression de la vitesse du son dans l'air (voy. les dernières propositions du second livre des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*). Cette expression conduisait à un résultat trop petit : elle donnait une vitesse qui n'était que les $\frac{5}{8}$ ouverts de la vitesse donnée par l'expérience. Newton avait lui-même essayé d'expliquer cette différence, mais il était réservé à

M. de la Place d'en trouver la véritable cause. Le mouvement qui constitue le son ne peut pas se propager dans un milieu quelconque sans comprimer les molécules auxquelles il se communique, et comme, en général, toute compression est accompagnée d'un dégagement de chaleur, M. de la Place suppose que c'est cette chaleur dégagée qui modifie la loi de l'élasticité et qui accélère la propagation du son. Si l'onde condensée produit de la

chaleur, l'onde raréfiée produit essentiellement du froid, et l'on pourrait croire que ces deux effets contraires se compensent exactement; ils se compensent en effet pour ce qui regarde la température, car le son qui passe dans l'air n'affecte nullement le thermomètre le plus sensible; mais cette compensation définitive dans la température n'empêche pas qu'il n'y ait successivement, entre deux molécules voisines, dégagement de chaleur et de froid, et n'empêche pas, par conséquent, que la loi de leur élasticité ne diffère de la loi de Mariotte.

Après avoir assigné cette cause, M. de la Place l'a transformée en calcul, et il a été conduit à la formule suivante, pour la vitesse de la propagation du son dans les gaz et les vapeurs.

$$v = \sqrt{\frac{gH}{\kappa}}$$

v , vitesse de propagation en 1'', évaluée en mètres.

g , gravité exprimée en mètres ou 98,8088.

H , hauteur de la colonne de mercure, évaluée en mètres et réduite à zéro, qui exprime la pression du gaz.

ρ , densité du gaz, celle du mercure à 0 étant prise pour unité.

κ , rapport des deux chaleurs spécifiques du gaz; c'est, comme nous l'avons vu (264), le quotient de sa capacité à pression constante, par sa capacité à volume constant.

Pour appliquer cette formule à l'air soumis à une pression et à une température quelconque t , il suffit de remarquer que la température 0 et sous la pression de 0^m,76, la densité de l'air par rapport au mercure est 10466,82 et qu'ainsi à la température t et sous la pression π on a :

$$\pi = \frac{0,76 \cdot 10466,82 (1 + at)}{v}$$

et par conséquent

$$v = \sqrt{\frac{9,8088 \cdot 0,76 \cdot 10466,82 (1 + at)}{\kappa}}$$

Et comme nous avons vu précédemment (264) que pour l'air $\kappa = 1,3748$, il en résulte

$$v = 327,62 \sqrt{1 + at}$$

pour la vitesse du son dans l'air à la température t .
 a est le coefficient de la dilatation des gaz ou 0,00375.

On voit que cette vitesse est tout-à-fait indépendante de la pression et dépendante seulement de la température.

C'est d'après cette formule que nous avons calculé la vitesse du son dans l'air supposée depuis -50 jusqu'à +50°. Les corrections qu'il faudrait faire pour la vapeur ne seraient sensibles que pour les températures élevées.

Tableau des vitesses du son dans l'air, depuis -50° à +50°.

Température.	Vitesse en mètres.	Température.	Vitesse en mètres.	Température.	Vitesse en mètres.
-50	295,93	-14	319,44	0	327,59
-49	295,91	-13	319,08	1	328,14
-48	296,56	-12	319,79	2	328,74
-47	297,26	-11	320,56	3	329,35
-46	297,94	-10	321,00	4	329,97
-45	298,61	-9	321,54	5	330,58
-44	299,29	-8	322,06	6	331,19
-43	299,95	-7	322,69	7	331,80
-42	300,62	-6	323,34	8	332,40
-41	301,30	-5	323,97	9	333,01
-40	301,96	-4	324,61	10	333,61
-39	302,63	-3	325,44	11	334,21
-38	303,29	-2	326,07	12	334,81
-37	303,95	-1	326,70	13	335,41
-36	304,64	0	327,32	14	336,01
-35	305,32	1	327,94	15	336,61
-34	305,94	2	328,57	16	337,21
-33	306,59	3	329,20	17	337,80
-32	307,24	4	329,81	18	338,40
-31	307,90	5	330,44	19	338,99
-30	308,55	6	331,09	20	339,58
-29	309,20	7	331,80	21	340,18
-28	309,85	8	332,49	22	340,77
-27	310,50	9	333,19	23	341,35
-26	311,15	10	333,89	24	341,94
-25	311,79	11	334,59	25	342,53

On voit que pour la température de 16° la vitesse est d'après la théorie de 337^m,21, tandis que l'expérience a donné 340^m,88. La différence 3^m,67 n'est que environ un centième de la quantité cherchée et elle est sans doute assez faible pour que l'on puisse l'attribuer aux erreurs d'observation, et peut-être en partie à l'influence de la vapeur d'eau répandue dans l'air au moment des expériences. Ainsi ce résultat est une confirmation frappante de la théorie de M. de la Place.

La formule précédente donnera sans doute avec la même exactitude la vitesse du son dans tous les fluides élastiques lorsqu'on connaîtra pour chacun d'eux le rapport κ des deux chaleurs spécifiques. On réciproquement la vitesse de la propagation du son dans un gaz quelconque étant déterminée, on en pourra déduire la valeur de κ ; et il se présente un procédé assez simple pour chercher la vitesse du son dans un gaz : il consiste à faire vibrer un tuyau, de longueur connue, rempli de ce gaz, et à noter le son résultant. Ces expériences n'auraient pas moins d'intérêt pour la théorie de la chaleur que pour celle de l'acoustique; et l'on voit à quel degré de perfection ces théories ont été portées par M. de la Place, puisqu'il suffit maintenant qu'un expérimentateur écoute le son produit par un tuyau vi-

brant de grandeur connue pour en pouvoir déduire la vitesse de la propagation du son dans le gaz qui remplit le tuyau et même le rapport des deux élasticités spécifiques de ce gaz.

En supposant que pour l'oxygène et l'azote la valeur de κ soit sensiblement la même que pour l'air, c'est-à-dire 1,3748, on trouverait 341^m,33 pour la vitesse du son dans l'azote à 16°, et 321^m,13 pour sa vitesse dans l'oxygène; ainsi le son mettrait 11^m,718 à parcourir 4 mille mètres dans l'azote et 12^m,456 dans l'oxygène. La différence 0^m,738 serait très appréciable; pour une distance de 8000 mètres elle deviendrait 1^m,5. Il n'a semblé que l'on pourrait tirer de là un moyen direct de reconnaître si dans l'air atmosphérique les molécules d'oxygène exercent leurs pressions sur les molécules d'azote et *vice versa*. En effet, si dans le mélange qui constitue l'atmosphère, les molécules de l'un des gaz ne pouvaient pas presser les molécules de l'autre, il y aurait toujours deux sons qui se propageraient séparément, l'un plus rapide se transmettrait par l'azote, et l'autre plus lent par l'oxygène, et à 8000 mètres de distance le premier serait entendu 1^m,5 avant le second. Ces deux sons, il est vrai, n'auraient pas la même intensité, puisque, dans l'air, l'azote est plus dense que l'oxygène. En 1823, j'ai fait avec M. Arnould, capitaine d'artillerie, plusieurs expériences dans le but de résoudre cette question. M. de Clermont Tonnerre, alors ministre de la guerre, nous avait donné avec sa bienveillance accoutumée toutes les autorisations convenables. Nos expériences eurent lieu à quelque distance de Paris, dans la plaine de Villejuif d'abord et ensuite dans la plaine de Maisons; nous nous plaçons successivement à 4, 5, 6, 7 ou 8 mille mètres du canon; il nous fut assez facile de trouver des stations d'où l'on put apercevoir la lumière de l'explosion et entendre au son bien net et tout-à-fait instantané, sans écho ni roulement; mais dans aucune des expériences il ne nous fut possible de distinguer deux sons, l'un plus fort, l'autre plus faible, et espacés comme ils auraient dû l'être s'ils se fussent propagés le premier par l'azote et le second par l'oxygène.

Nous devons donc en conclure, ou que les molécules des différents gaz se pressent l'une l'autre, ou que le bruit du canon qui se propagerait par l'oxygène de l'air est d'une trop faible intensité pour être entendu à la distance où il pourrait être séparé par un intervalle sensible du bruit plus intense qui se propage dans l'azote. En admettant la première conclusion il faudrait renoncer aux raisonnements que l'on a coutume de faire pour expliquer plusieurs phénomènes que présentent les mélanges gazeux et surtout la promptitude avec laquelle les odeurs et les vapeurs se dissèment dans des masses d'air d'une grande étendue.

503. *Vitesse du son dans les liquides.* — M. de la

Place a aussi donné la formule suivante pour calculer la vitesse du son dans les liquides (*Ann. de Phys. et de Chim.*, t. 3, pag. 164 et 238).

$$v = \sqrt{\frac{g}{\lambda}}$$

v , vitesse du son dans le liquide, exprimée en mètres.

g , gravité, exprimée en mètres ou 9^m,8088.

λ , raccourcissement qu'éprouve une colonne horizontale du liquide de 1 mètre de longueur lorsqu'elle est comprimée dans un tube sans élasticité par un poids égal au sien.

Pour appliquer cette formule il suffit donc de connaître λ . Or, cette détermination est facile quand on connaît les compressions des liquides sous le poids d'une atmosphère, comme nous les avons rapportées dans la page 300. En effet, l'eau, par exemple, se comprimant de 47,85 millièmes de son volume sous une pression d'une atmosphère, il est évident qu'une colonne d'eau de 1 mètre se comprimera de 47,85 millièmes de mètres dans un tube sans élasticité. L'atmosphère qui a donné cette compression était une colonne de mercure de 0^m,76 de hauteur à la température de 10°, ayant par conséquent une densité de 13,544. Elle était équivalente à une colonne d'eau de 10^m,2934; ainsi une colonne d'eau de 1 mètre donnerait un

raccourcissement de $\frac{0,00004785}{10,2934}$ ou 0^m,000046486;

c'est la valeur de λ ; on la substituant dans la formule on trouve enfin qu'à la température de 10°, la vitesse du son dans l'eau est de 1453 mètres par seconde.

La formule précédente peut facilement être transformée de la manière suivante :

$$v = \sqrt{\frac{9,8088 \cdot 0,76 \cdot 13,544 \times 1000000}{\rho c}}$$

ρ est la densité du liquide par rapport à l'eau.

c , la compressibilité du liquide pour une atmosphère, en prenant pour unité les millièmes tels qu'ils sont rapportés dans la troisième colonne du tableau de la page 300.

Sous cette forme, il n'y a plus qu'à substituer pour ρ et c leurs valeurs et achever le calcul. Le résultat sera la vitesse du son dans le liquide à la température de 10°, parce que toutes les compressions de la page 300 sont déterminées pour cette température. On trouve ainsi les résultats suivants.

Vitesse du son dans divers liquides à la température de 10°.

Noms des liquides	Densité.	Compressibilité sous 1 atm. évaluée en millièmes du volume primitif.	Vitesse du son en 1° exprimée en mètres.
Éther sulfurique. . .	0,712. . .	131,35. . .	1030
Alcool.	0,795. . .	94,95. . .	1157
Étherhydrochlorique. .	0,874. . .	84,25. . .	1171
Essence de térébenthine.	0,870. . .	71,35. . .	1276
Eau.	1.	47,85. . .	1453
Mercure.	13,544. . .	3,38. . .	1484
Acide nitrique. . .	1,403. . .	30,55. . .	1535
Eau saturée d'ammoniaque.	0,9. . . .	33,05. . .	1842

L'eau est le seul de ces liquides qui ait été soumis à des expériences directes. M. Colladon a trouvé que la vitesse du son dans l'eau du lac de Genève, est de 1435 mètres par seconde; ce nombre est assez peu différent de 1453 que donne la théorie. Cependant, quelque petite que soit la quantité de chaleur dégagée par les liquides pendant leur compression, l'on aurait pu s'attendre à voir le résultat de l'expérience surpasser un peu celui de la théorie.

Les nombres de la troisième colonne sont tous empreints de l'incertitude qui peut rester sur les densités des liquides et de l'incertitude plus grande encore qui peut rester sur leur compressibilité; en prenant, par exemple, pour l'alcool la compressibilité de M. Ørsted, on trouverait 2423 mètres pour la vitesse du son dans ce liquide, au lieu de 1157 que donne la compressibilité de MM. Colladon et Sturm.

503. Vitesse du son dans les solides.

La formule que M. de la Place a donnée pour les liquides s'applique aussi aux corps solides. Il paraît seulement qu'il reste alors quelque incertitude théorique sur la manière dont on doit estimer la valeur de λ ; on admet bien qu'une tige de métal placée horizontalement se raccourcit ou s'allonge de la même quantité, lorsqu'elle est pressée ou tirée dans sa longueur par des forces égales; et comme il est plus facile, dans les solides, de mesurer l'allongement que le raccourcissement, on admet que dans la formule

$$v = \sqrt{\frac{g}{\lambda}}$$

λ représente l'allongement qu'éprouve une tige de 1 mètre de longueur, tirée par un poids égal au sien. Mais nous avons vu (462 et 463) que cet allongement n'est pas le même, si l'on suppose que la tige est tirée par ses deux bouts et libre par son contour, ou si l'on suppose qu'elle est tirée par tous les points de la surface. Plusieurs considérations font présumer que λ doit, dans les solides comme dans les liquides, représenter le changement

de volume que la tige éprouve lorsqu'elle est sollicitée par des forces égales sur tous les points de sa surface. Dans cette hypothèse, on devrait prendre pour λ les $3/2$ de l'allongement que la tige éprouve lorsqu'elle est simplement tirée par ses deux extrémités. Ainsi, d'après les expériences de MM. Colladon et Sturm, une tige de verre s'allongeant de 11 dix-millionièmes pour une traction équivalente à 1 atmosphère, il faudrait prendre $33/2 = 16,15$ dix-millionièmes pour le changement de volume du verre soumis à cette traction en tous ses points. Ensuite, en réduisant ce changement de volume à ce qu'il ferait pour une traction équivalente au poids d'une tige de verre de 1 mètre, on trouverait 4859 mètres pour la vitesse du son dans le verre. Borda ayant trouvé qu'une lame de laiton de 3^m,7356 pesant 1,1320 kilog. s'allonge de 0^m,0001121 pour une traction de 11,7484 kilog., il est facile de conclure par la même hypothèse que la vitesse du son dans cette substance est de 2905 mètres.

M. Chladni a imaginé depuis long-temps une autre méthode tout-à-fait directe et expérimentale pour déterminer la vitesse du son dans les solides.

Soit v , la vitesse du son dans l'air, l la longueur d'un tuyau ouvert, et n le nombre des vibrations qu'il fait en 1^{re}, lorsqu'il donne le son fondamental. La longueur des ondes qu'il excite est alors égale à la longueur l du tuyau (480); ainsi, les n ondulations qu'il excite en 1^{re} forment une longueur $n l$ qui est précisément égale à la vitesse v , c'est-à-dire, à l'espace que le son parcourt en 1^{re}. On a donc

$$v = n l.$$

Soit v' la vitesse du son dans une substance solide quelconque, l' la longueur d'une verge cylindrique de cette substance, et n' le nombre des vibrations qu'elle fait en 1^{re}, lorsqu'elle donne le son fondamental, c'est-à-dire, lorsqu'elle vibre longitudinalement, ayant ses extrémités libres et un nœud au milieu. La longueur des ondes qu'elle excite alors dans sa propre substance est égale à l' (483); ainsi, les n' ondulations qu'elle excite en 1^{re}, forment une longueur $n' l'$ qui est précisément égale à la vitesse v' du son, c'est-à-dire, à l'espace que le son parcourt en 1^{re}. On a donc

$$v = n' l'.$$

Au moyen de cette équation et de la précédente, on tire

$$v' = v \cdot \frac{n'}{n}$$

D'où il suit que, pour trouver la vitesse v' du son dans une substance solide quelconque, il suffit d'écouter le son fondamental que produit une verge de cette substance vibrant longitudinalement, et de le comparer au son fondamental que donne un tuyau ouvert de même longueur. Le rapport de ces sons, multiplié par la vitesse du son dans l'air, donne pour produit la vitesse cherchée.

Supposons, par exemple, que l'on fasse vibrer longitudinalement une verge ou une lame de bois de pin de 8 pieds de longueur, en la soutenant au milieu et en la frottant vers un de ses bouts avec un morceau de drap enduit de colophane, le son qu'elle produit se trouve à l'unisson sur le clavier avec ut_1 . Or, on sait qu'un tuyau ouvert de 8 pieds

produit ut_1 ; ainsi, $\frac{8'}{8} = \frac{ut_1}{2} = 16$. D'où

il suit que dans le bois de pin, la vitesse est 16 fois plus grande que dans l'air, ou

$$v' = 340. 16 = 5440.$$

C'est d'après une série d'expériences analogues que M. Chladni a dressé le tableau suivant :

Tableau des vitesses du son dans plusieurs substances solides.

Noms des substances.	Vitesse comparée à celle du son dans l'air.	Vitesse exprimée en mètres.
Fanon de baleine.	6 $\frac{2}{3}$	2266
Étain.	7 $\frac{1}{2}$	2550
Argent.	9	3060

Noms des substances.	Vitesse comparée à celle du son dans l'air.	Vitesse exprimée en mètres.
Bois de noyer.	(1) 10 $\frac{2}{3}$	3624
— d'if.		
Laiton.	10 $\frac{2}{3}$	3524
Bois de châtaigne.		
— de prunier.	10	3400
Tubes de pipes de tabac.		
Cuivre rouge.	12	4080
Bois de poirier.	12 $\frac{1}{2}$	4080
— de hêtre.	13 $\frac{1}{3}$	4250
— d'érable.		
— d'acajou.	14 $\frac{2}{5}$	4532
— d'ébène.		
— de charme.	14 $\frac{2}{5}$	4896
— d'orme.		
— d'aune.	15	5100
— de hêtre.		
— de tilleul.	16	5440
— de cerisier.		
— de saule.	16 $\frac{2}{3}$	5064
— de pin.		
Verre.	18	6120
Fer ou acier.		
Bois de sapin.	18	6120

(1) Quand les fibres de ces bois ne sont pas exactement droites, le son est plus grave quelquefois d'un tiers.

CHAPITRE VII.

DE LA VOIX ET DE L'ŒUE.

304. De la voix humaine. — L'organe de la voix est composé de plusieurs parties dont la forme et l'arrangement ne peuvent être étudiés d'une manière complète que par des observations anatomiques. Nous devons donc nous borner à faire comprendre d'une manière générale la disposition des diverses pièces qui concourent plus directement à la production de la voix.

On sait que la trachée-artère est une espèce de tube qui se termine, d'une part, à l'arrière-bouche, et de l'autre, aux poumons. Sa principale fonction est de donner passage à l'air, soit dans l'expiration, soit dans l'inspiration. Ce tube est à peu près cylindrique et composé d'anneaux fermes et cartilagineux, séparés par des anneaux membraneux flexibles. A son extrémité inférieure il se divise en deux tubes plus petits qui se portent l'un à droite et l'autre à gauche; on les appelle les bronches; chaque bronche, à son tour, donne naissance à plusieurs divisions et subdivisions qui vont, dans tous les sens, se ramifier dans le tissu du poumon; à son extrémité supérieure il se termine par le larynx, qui paraît être essentiellement l'organe de la voix.

Le larynx est composé de quatre cartilages : le

cricoïde, le thyroïde et les deux arithénoïdes. Ces cartilages, de formes très différentes, sont articulés entre eux et liés à l'anneau supérieur de la trachée-artère. Plusieurs muscles sont disposés pour donner un mouvement à leur ensemble ou pour leur imprimer des mouvements relatifs. C'est l'arrangement de ces muscles, et surtout des derniers, qui donne à l'organe sa forme intérieure : ils s'attachent d'abord à droite et à gauche contre les parois intérieures du tube qui forme le prolongement de la trachée-artère, et diminuent de plus en plus son diamètre transversal, tellement qu'à la fin il ne reste plus qu'une fente qui se dirige d'arrière en avant, sans être horizontale, mais en s'élevant assez rapidement; cette fente est ce que l'on nomme la glotte : elle a 8 ou 10 lignes de longueur; ses bords sont appelés les lèvres de la glotte, leur distance est très variable; il paraît que les lèvres de la glotte peuvent se presser au point de ne laisser en arrière qu'une très petite ouverture. Au-dessus des lèvres de la glotte, sont deux cavités, l'une à droite et l'autre à gauche, qui s'étendent latéralement à la profondeur de 8 à 9 lignes

et quelquefois de 12 lignes; elles ont 5 à 6 lignes de hauteur; on les appelle les *ventricules*. Les parois supérieures des ventricules se rapprochent de manière à former en quelque sorte une seconde glotte à 5 ou 6 lignes de hauteur, au-dessus de la première. Enfin, il y a au-dessus du larynx une membrane ou plutôt un cartilage que l'on appelle *épiglotte*, il est fixé antérieurement par un de ses bords et peut s'abaisser sur la glotte.

Cette description sommaire du larynx nous permettra de comprendre les principes sur lesquels on s'appuie pour expliquer la formation de la voix.

Sans entrer ici dans le détail historique de toutes les explications plus ou moins vagues qui en ont été données, nous nous contenterons de rapporter deux opinions entre lesquelles les physiiciens semblent encore partagés. Les uns considèrent l'organe de la voix comme un instrument analogue aux instruments à anche; les autres le considèrent comme un instrument analogue aux réclames.

Pour assimiler le son de la voix au son d'une anche, on suppose que, pendant l'*expiration*, l'air poussé dans la trachée-artère, et pressé dans le passage étroit du larynx, ne peut pas sortir sans frotter les lèvres de la glotte et sans les mettre en vibration; ces lèvres, dit-on, vibrent alors, comme la languette d'une anche; elles vibrent toutes deux, ce qui donne au son plus d'intensité; ensuite l'épiglotte, le pharynx, le voile du palais les fosses nasales, la langue, les dents, l'ouverture de la bouche et la disposition des lèvres, donnent au son, ainsi formé, un accent et un timbre particulier; comme le tuyau d'écoulement de l'anche donne, suivant sa forme, un timbre particulier au son qui résulte des vibrations de la languette. Le son restant le même, quant à l'intensité et au ton, pourra recevoir des modifications sans nombre, dans l'accent et le timbre, parce que toutes les pièces dont nous venons de parler peuvent elles-mêmes être modifiées par la volonté d'une infinité de manières. Un seul son, un fois expliqué, toutes les nuances des sons que la voix humaine peut produire s'expliquent aisément; car un petit mouvement de la rasette, change la longueur de la languette, et fait rendre à l'anche ordinaire un son plus grave ou plus aigu; il suffit donc de donner aux lèvres de la glotte un peu plus ou un peu moins de tension, pour que la voix parcoure successivement plusieurs octaves ascendantes ou descendantes; et même, ajoute-t-on, nous avons pour cela deux moyens, car nous pouvons non-seulement changer la tension des lèvres de la glotte, mais nous pouvons encore changer leur longueur, puisque l'ouverture de la glotte est tellement faite qu'il suffit d'un acte de la volonté pour l'agrandir ou pour la fermer presque complètement.

Ces considérations ingénieuses semblent fortifiées par quelques expériences directes. M. Magendie a mis le larynx à découvert sur des chiens

vivants, et il a vu les lèvres de la glotte entrer en vibration dès que ces animaux poussaient des cris; il a pu constater aussi, dans les mêmes expériences, que les lèvres de la glotte se rapprochent pour les sons aigus, et qu'elles restent au contraire plus ou moins éloignées pour les sons graves. Plusieurs observateurs ont fait des expériences analogues sur des larynx d'animaux récemment privés de la vie; on soufflant avec un fort soufflet dans la trachée-artère, ils ont obtenu des sons plus ou moins analogues à ceux que pouvaient rendre ces animaux. M. Biot, en répétant ces expériences sur un larynx de cochon, et en serrant la trachée avec la main à la hauteur de la glotte, est parvenu à imiter parfaitement le grognement d'un cochon vivant. (*Traité élém. de Phys.*, tom. 1, pag. 462.)

Pour assimiler le son de la voix aux sons des *réclames*, on regarde les ventricules du larynx comme une espèce de tambour rempli d'air, et les deux glottes comme deux ouvertures correspondantes pratiquées dans les deux bases de ce tambour; ainsi les ventricules et les deux glottes forment un véritable réclame. L'air, poussé par les pommons dans la trachée, sort avec plus ou moins de vitesse par le larynx; il entraîne dans son mouvement une partie de l'air des ventricules, et bientôt la pression étant devenue trop faible, l'air extérieur se précipite dans la cavité des ventricules; puis il est de nouveau entraîné au dehors, etc., exactement comme dans les réclames (400). Ces alternatives produisent un son plus ou moins aigu, suivant la rapidité avec laquelle elles se succèdent. Dans cette hypothèse, comme dans la précédente, l'accent et le timbre dépendent des vibrations des lèvres de la glotte, et de toutes les parties qui peuvent prendre diverses formes ou divers mouvements, depuis l'arrière-bouche jusqu'aux lèvres.

Les sons différents seront produits, soit par diverses formes, que les cavités des ventricules peuvent prendre, soit par diverses dimensions des ouvertures de la glotte, soit enfin par divers degrés de tension dans les lèvres de la glotte et dans toutes les parties du larynx et de l'arrière-bouche. M. Savart a fait plusieurs expériences qui semblent fortifier cette hypothèse. (*Ann. de phys. et de chim.*, tome xix, pag. 64.)

Ces deux opinions paraissent sans doute plus différentes qu'elles ne le sont en effet; mais quoique liées par des rapports intimes, elles ne peuvent pas encore dans leur ensemble donner une explication complète du phénomène de la voix. On doit les considérer comme des aperçus heureux qui pourront un jour conduire à la vérité.

505. *De la voix des oiseaux.* — Chez les oiseaux, l'organe de la voix n'est pas à l'arrière-bouche, mais il se trouve au contraire à l'extrémité inférieure de la trachée, là où elle se bifurque pour donner naissance aux bronches. M. Cuvier a fait

voir, en effet, qu'un canard qui vient d'avoir la tête tranchée pousse encore pendant quelques instans des cris très forts et très bien articulés; et la même expérience peut être faite sur la plupart des oiseaux. L'observation anatomique confirme ce résultat, car, en suivant l'organisation de la trachée, on trouve qu'à son extrémité supérieure elle se termine en général par un simple rétrécissement, un par une espèce de glotte qui n'offre aucune des dispositions nécessaires à la production des sons; tandis qu'à son extrémité inférieure elle présente un appareil très complexe et merveilleusement ajusté pour produire une longue série de sons graves ou aigus, mais, comme il nous serait impossible d'en donner une idée sans entrer dans les détails anatomiques qui nous écarteraient trop de notre plan, et comme, d'une autre part, il se présente encore de grandes difficultés dans les théories qui ont été proposées jusqu'à présent pour expliquer tous les phénomènes qui résultent de cette organisation, nous nous contenterons de renvoyer aux ouvrages qui ont été publiés sur ce sujet et particulièrement aux Mémoires de M. Savart. (*Annales de phys. et de chim.*, tom. XLIII.)

5^{me} De l'organe de l'ouïe. — La seule partie extérieure de cet organe est le *pavillon*, dont les replis et les contours ne sont, comme on sait, que l'épanouissement du *conduit auditif*. Ce conduit, après s'être enfoncé à une petite profondeur, est terminé obliquement par une membrane mince, mobile et élastique que l'on appelle la *membrane du tympan*. Derrière cette membrane est la *caisse du tympan*; c'est une cavité osseuse, tapissée de diverses membranes et remplie d'air; elle est fermée de toutes parts, excepté en un point où aboutit la *trompe d'Eustache* qui part de l'arrière-bouche; par ce moyen l'air peut se renouveler et se mettre sans cesse en équilibre avec la pression atmosphérique. On distingue encore dans la caisse du tympan deux ouvertures fermées par des membranes, savoir : la *fenêtre ovale* en haut, et plus bas la *fenêtre ronde*. Enfin, dans l'intérieur même de cette caisse est suspendue la *chaîne des osselets*, qui se compose de quatre petits os irréguliers, que l'on appelle par analogie de forme le *marteau*, l'*enclume*, le *lenticulaire* et l'*étrier*. Le marteau est attaché longitudinalement sur la membrane du tympan, il forme une espèce de rayon solide, qui vient de la circonférence au centre. A son autre extrémité il se lie à l'enclume, l'enclume au lenticulaire, et le lenticulaire à l'étrier, qui va s'attacher sur la membrane de la fenêtre ovale : plusieurs muscles agissent sur cette chaîne pour la tendre ou la relâcher, et, par conséquent, pour tendre et relâcher en même temps la membrane du tympan et celle de la fenêtre ovale. La membrane de la fenêtre ronde sépare la caisse du tympan d'un conduit osseux, contourné en spirale, qui se nomme

le *limaçon*; l'autre extrémité de ce conduit s'ouvre dans une cavité qui s'appelle le *vestibule*. Le vestibule est séparé de la cavité du tympan par la membrane de la fenêtre ovale; enfin il communique avec trois canaux osseux, que l'on nomme canaux semi-circulaires, et qui sont remplis d'une matière grisâtre dont l'usage est inconnu.

Le vestibule et les spires du limaçon sont remplis d'un liquide transparent que l'on appelle *liquide de cotunni*; c'est dans ce liquide que viennent flotter les derniers filets du *nerf acoustique*.

D'après cette disposition de l'organe on peut remarquer d'abord que, si la trompe d'Eustache n'établissait pas une communication libre, entre l'air de l'arrière-bouche et celui de la caisse du tympan, il y aurait des inégalités de pression qui donneraient à la membrane du tympan des tensions différentes; cette circonstance, qui se présente quelquefois par accident ou par suite de maladie, est en général accompagnée de bourdonnements plus ou moins incommodes.

En supposant que la membrane du tympan ait une tension convenable, on conçoit qu'elle entre en vibration dès qu'une onde sonore vient la frapper, et si plusieurs ondes viennent la frapper à la fois elle se met à l'unisson avec chacune d'elles, comme ferait une membrane inerte; ces vibrations *coexistantes* sont faciles à concevoir, d'après ce que nous avons dit précédemment. Ce fait est à peu près tout ce que l'on sait de certain sur le phénomène de l'audition.

Comment ces vibrations sont-elles transmises au *nerf acoustique*? quels rôles jouent dans cette transmission la chaîne des osselets, le limaçon et les canaux semi-circulaires? Ces questions restent sans solution ainsi que beaucoup d'autres que l'on peut se proposer sur ce sujet.

On sait cependant que la membrane du tympan peut être enlevée et même que la chaîne des osselets peut être rompue sans que l'organe cesse de remplir ses fonctions; et que, réciproquement, l'on peut être affecté de surdité complète, sans qu'il y ait aucune trace apparente de désordre dans les diverses pièces qui composent l'oreille.

On suppose que le pavillon sert à renforcer les sons et à juger de leurs directions, sans qu'il soit possible d'assigner précisément comment il remplit ce double but.

On suppose enfin que la chaîne des osselets peut servir à éviter les sensations trop vives, et qu'il suffit, par son moyen, de tendre fortement la membrane du tympan pour amortir à un haut degré le bruit trop violent qui viendrait la frapper. Quelques personnes prétendent en effet qu'elles peuvent se rendre sourde à volonté. Mais il nous reste encore beaucoup de vérités importantes à découvrir sur ce sujet.

LIVRE HUITIÈME.

OPTIQUE.

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LA PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

507. Les expériences les plus simples et les plus familières nous apprennent qu'un *corps lumineux* quelconque propage la lumière dans tous les sens; car, la flamme d'une bougie, par exemple, serait visible de tous les points d'une sphère dont elle occuperait le centre; il en serait de même d'un corps phosphorescent, d'une étincelle électrique ou d'un boulet porté au rouge par l'action du feu. Ce qui se montre en petit dans nos expériences habituelles, se manifeste en grand dans l'immense étendue du ciel : le soleil répand de toutes parts le même éclat dans l'espace, et sa lumière brille à la fois sur la terre, sur les planètes, sur les comètes, et sur tous les corps du firmament, quel que soit le point qu'ils occupent dans la sphère infinie du monde.

Les corps lumineux sont essentiellement composés de matière pondérable : nous verrons que, sans matière, il n'y a point de lumière possible; je *répète*, tel que nous l'avons défini (20), peut bien propager la lumière, mais non lui donner naissance. Il en résulte que les corps lumineux peuvent être divisés en fragmens pondérables de plus en plus petits, et les derniers fragmens que nous puissions physiquement concevoir sont ce que l'on appelle des *points lumineux*. Ainsi, comme un corps ordinaire est une réunion de molécules ou d'atomes, un corps lumineux est une réunion de points lumineux.

Chaque point lumineux répand de la lumière dans tous les sens; car on distingue très bien la flamme d'une bougie ou à travers de la flamme d'une autre bougie; et quand les deux flammes se touchent, on reçoit, en les regardant de profil, une impression plus vive qu'en les regardant de face. Cette expérience est surtout frappante dans l'éclairage au gaz, lorsqu'on observe une nappé de flamme ou éventail : de face la lumière est tolérable, de profil elle est éblouissante. Dans un boulet ébauffé au rouge, on ne peut guère douter que les points du centre ne propagent de la lumière comme ceux de la surface; cependant cette lumière n'arrive pas à l'œil, elle est absorbée dans l'épaisseur de la matière; il en est de même de la lumière qui est

propagée en dedans par les points de la surface. Ainsi par sa nature la lumière se répand toujours dans tous les sens, mais elle n'est pas toujours transmise dans tous les sens avec la même facilité.

508. *Dans un milieu homogène la lumière se propage toujours en ligne droite.* — En disposant, par exemple, sur une longue règle, trois disques percés en leur centre d'un trou très petit, on voit à une grande distance la flamme d'une bougie, ou bien on cesse de l'apercevoir, suivant que les trous sont ou ne sont pas en ligne droite. On conçoit qu'il y a une foule de moyens, indépendans de la lumière, pour s'assurer que trois points sont en ligne droite. Quand la lumière vient rencontrer une glace polie ou un miroir de métal *xx'*, suivant la direction *xx*, par exemple (Fig. 552), elle est renvoyée suivant une autre direction *xx'*, et continue de se monvoir en ligne droite suivant cette nouvelle direction tant qu'elle reste dans un milieu sensiblement homogène.

Cette déviation que la lumière éprouve en tombant sur des surfaces polies s'appelle la *réflexion* de la lumière.

509. *Dans un milieu hétérogène la lumière se meut toujours en ligne courbe* : ainsi l'atmosphère, par exemple, formant un milieu hétérogène à cause de l'inégale densité de l'air, la lumière du soleil ne nous arrive jamais en ligne droite, et il en résulte que nous ne voyons jamais cet astre au lieu où il est en réalité. Nos observations sur les étoiles et sur tous les corps très élevés ou très éloignés sont accompagnées des mêmes illusions.

Quand la lumière passe de l'eau dans l'air ou de l'air dans l'eau, l'hétérogénéité des milieux qu'elle traverse est encore plus grande; aussi la *déviation* des objets est encore plus frappante : pour s'en assurer il suffit de prendre un vase *vv'* (Fig. 553), de placer l'œil en *o* de manière que l'on aperçoive à peine le premier bord d'une pièce de monnaie *xx'*, le reste étant caché par le bord *a*, et de verser ensuite de l'eau dans le vase; à mesure que le niveau s'élève, la pièce *xx'* semble s'avancer vers le centre, et l'on parvient enfin à l'apercevoir dans toute sa largeur, quoique en réalité elle continue

d'être cachée par le bord du vase. Donc, la lumière ne vient pas en ligne droite de la pièce aa' vers l'œil : mais elle se propage en ligne droite dans l'eau et en ligne droite dans l'air, car chacun de ces milieux est sensiblement homogène dans une si petite épaisseur, et nous démontrerons plus tard qu'elle suit alors une ligne brisée analogue à $x1e$.

Au moyen de l'air atmosphérique, nous voyons déjà les astres avant leur lever et nous les voyons encore après leur coucher; c'est un résultat analogue au précédent, car nous apercevons la pièce aa' au moyen de l'eau, bien qu'elle soit cachée par le bord du vase comme le sont les astres par les montagnes ou les plaines qui limitent notre horizon. Il y a seulement cette différence qu'en traversant les couches successives de l'atmosphère, la lumière ne rencontrant pas de changements brusques de densité, ne se brise pas brusquement, comme elle fait en passant de l'eau dans l'air, et alors elle suit une ligne courbe au lieu d'une ligne brisée.

Cette déviation que la lumière éprouve en traversant des milieux hétérogènes s'appelle la *réfraction*.

510. Un rayon lumineux ou un rayon de lumière est la direction que suit la lumière en se propageant. — Un pinceau est la réunion de plusieurs rayons voisins. — Un faisceau est la réunion de plusieurs rayons ou de plusieurs pinceaux voisins ou séparés.

Si d'un point quelconque de la flamme d'une bougie l'on conçoit des lignes droites dans toutes les directions, suivant chacune de ces lignes droites il y aura un rayon de lumière, puisque la lumière se propage dans tous les sens et en ligne droite; mais lorsqu'on s'éloignera assez de la flamme pour que le milieu devienne sensiblement hétérogène, les rayons de lumière commenceront à se courber, et les lignes droites primitives ne représenteront plus leurs directions.

Quand la lumière se propage dans un milieu homogène autour d'un point lumineux, et qu'on le reçoit sur une surface quelconque, l'on a coutume de dire que cette surface est éclairée par un pinceau lumineux quand elle est petite, et par un faisceau lumineux quand elle est plus grande. Alors on regarde cette surface comme la base d'un cône dont le point lumineux est le sommet, et la lumière du pinceau ou du faisceau est la lumière comprise dans le cône. Mais quand la lumière passe dans un milieu hétérogène, tous les rayons d'un même faisceau commencent à se propager suivant des lignes courbes, et en général suivant des lignes courbes différentes, et il n'est plus vrai de dire alors que le faisceau est un cône droit.

Un pinceau ou un faisceau de lumière est naturellement *divergent*, c'est-à-dire que sa section est d'autant plus grande qu'elle s'éloigne davantage du point lumineux. Cependant, quand le point lumineux est très éloigné en dit que le faisceau est *parallèle*, parce que toutes les sections sont sensiblement

égales, ou, ce qui revient en même, tous les rayons sont sensiblement parallèles. Ainsi, par exemple, la lumière que nous envoie le centre du soleil forme un faisceau parallèle, car deux lignes qui sont à la surface de la terre distantes de quelques pouces, ou même de quelques lieues, et qui vont se rencontrer au centre du soleil, sont deux lignes parallèles.

Les faisceaux de lumière naturelle, convenablement modifiés, peuvent devenir des *faisceaux convergens*, c'est-à-dire que les rayons sont ramenés dans une telle direction qu'ils concourent tous au même point. Ce point de concours de tous les rayons d'un faisceau se nomme un *foyer*. Mais c'est une chose digne de remarque qu'après s'être ainsi rassemblés et concentrés en un foyer, tous les rayons continuent leur route, comme si chacun d'eux était seul, d'où il suit qu'au delà du foyer, le faisceau devient *divergent*, comme un faisceau naturel.

511. L'intensité de la lumière d'un point lumineux décroît comme le carré de la distance augmentée.

On sait que les sections as et $a's'$ d'un cône droit (Fig. 554), sont entre elles comme les carrés des distances au sommet sa et sa' ; sa' étant, par exemple, double de sa , la section $a's'$ sera quadruple de la section as . Or, ce cône étant un faisceau lumineux, il est évident que la lumière qui passe en as est la même que celle qui passe en $a's'$, et puisqu'ici elle est répartie par un espace quadruple, elle doit en éclairer chaque partie avec une intensité quatre fois moindre.

Cette proposition ne s'applique pas rigoureusement à un corps lumineux d'une grande étendue, dont on recevrait le lumière à de petites distances. Car le point s' n'éclaire pas as tandis qu'il éclaire $a's'$, et les points qui seraient compris entre s et s' enverraient tous en $a's'$ plus de lumière qu'en as ; par conséquent un corps lumineux qui s'étendrait de s et s' donnerait sur as un éclat qui ne serait pas quadruple de celui qu'il donnerait sur $a's'$.

512. Les corps qui ne sont pas lumineux par eux-mêmes se distinguent en *corps opaques*, comme le bois, la pierre et les métaux; *corps diaphones* ou *transparents*, comme l'air, l'eau et le verre; et *corps translucides*, comme le papier mince et le verre dépoli.

Les *corps opaques* ne transmettent point de lumière au travers de leur masse. Mais l'opacité est plutôt dépendante de l'épaisseur que de la nature des substances, car tous les corps réduits en lames en en feuilles assez minces laissent passer une partie de la lumière qu'ils reçoivent; ainsi, au travers d'une feuille d'or collée sur du verre on distingue une leur verdâtre très sensible, lorsqu'on regarde une bougie ou même la lumière du ciel ou des étoiles.

Les *corps diaphones* transmettent la lumière et laissent apercevoir nettement au travers de leur substance toutes les formes des objets. Les gaz, les li-

quides et la plupart des corps cristallisés semblent, en général, avoir une diaphanéité parfaite lorsqu'ils sont en petite masse; car ils sont absolument incolores et ils laissent apercevoir non-seulement les formes des objets, mais encore toutes les nuances de leurs couleurs. Cependant les plus diaphanes de ces corps deviennent colorés quand ils ont une épaisseur suffisante, et c'est une preuve qu'ils absorbent alors une partie de la lumière qui les traverse. Ainsi, une goutte d'eau est parfaitement limpide; l'eau prise en masse est bleu ou verte, et l'on calcule qu'un observateur qui serait plongé à 150 pieds de profondeur dans la mer la plus diaphane, ne trouverait pas plus d'éclat à la lumière du soleil que nous n'en trouvons à la lumière de la lune.

Les corps translucides laissent passer une partie de la lumière qu'ils reçoivent, mais ils ne laissent distinguer ni la couleur, ni la distance, ni la forme des objets. Dans le langage ordinaire, le mot transparent s'applique souvent aux corps translucides comme aux corps diaphanes.

513. De l'ombre et de la pénombre. — Quand un corps opaque est éclairé par un seul point lumineux, la forme de l'ombre qui en résulte est facile à trouver : en effet, si l'on conçoit une ligne droite qui passe par le point lumineux et qui fasse une révolution autour du corps en s'appuyant sans cesse sur son bord, cette ligne décrit une espèce de surface conique dont le prolongement au delà du corps donne la trace du contour de l'ombre (Fig. 555). Nous devons prévenir cependant que cette ombre géométrique ne coïncide jamais avec l'ombre physique, parce que la lumière se diffracte ou semble s'insinuer en passant près des limites des corps, et l'effet de cette diffraction est toujours de faire paraître de la lumière dans une partie plus ou moins grande de l'ombre géométrique et de faire paraître, au contraire, de l'ombre au dehors.

Ce qui précède s'applique à un assemblage quelconque de points lumineux, mais alors on distingue l'ombre et la pénombre. L'ombre est encore le lieu de l'espace qui ne reçoit aucune lumière, et la pénombre est l'ensemble des lieux qui sont dans l'ombre par rapport à quelques-uns des points, tandis qu'ils reçoivent la lumière des autres.

La lumière qui pénètre par une petite ouverture dans une chambre noire, c'est-à-dire, dans un espace exactement fermé de toutes parts, présente aussi des phénomènes d'ombre et de pénombre. Par exemple vv' (Fig. 556), étant la petite ouverture pratiquée au volet, le faisceau qui vient du point lumineux λ et qui pénètre dans la chambre est un cône indéfini, ayant λ pour sommet et $v v'$ pour base. La surface du cône est la limite géométrique qui sépare la lumière de l'ombre absolue; mais dans ce cas, comme dans le précédent, l'ombre physique est loin de coïncider avec l'ombre géométrique, car on observe de la lumière au dehors du cône et de l'ombre au dedans. Pour prendre

une idée plus nette de ce phénomène de diffraction; supposons que l'ouverture soit circulaire et de deux ou trois millimètres de diamètre, que le point lumineux n'envoie que de la lumière rouge et qu'on aille présenter au faisceau un grand tableau blanc à deux ou trois mètres dans l'intérieur de la chambre; alors, au lieu d'avoir sur ce tableau une tache circulaire rouge environnée d'ombre complète, telle que $\lambda \lambda'$ (Fig. 557), on aura, au contraire, des anneaux alternativement rouges et noirs (Fig. 558), soit au dedans, soit au dehors de la base géométrique du cône $\lambda \lambda'$ (Fig. 556.) Quand le point lumineux envoie de la lumière blanche ordinaire, alors, au lieu de ces alternatives d'ombre et de lumière, on distingue simplement des anneaux colorés où diverses nuances se succèdent à de petits intervalles. Une ouverture très grande produit encore des phénomènes analogues, mais seulement à une petite distance autour de la limite géométrique de l'ombre. Cependant nous devons pour le moment faire abstraction de ces effets remarquables, et supposer d'abord que la lumière se propage géométriquement en ligne droite, sans être modifiée ou diffractée près des limites des corps.

Dans cette hypothèse, chaque point lumineux donnant un faisceau brusquement séparé de l'ombre, il est clair que plusieurs points lumineux, tels que $\lambda, \lambda', \lambda''$ (Fig. 559), donneraient dans la chambre noire des faisceaux qui se propageraient comme s'ils étaient seuls, et qu'il en résulterait des espaces diversement éclairés. En λ , par exemple, il arriverait des rayons des trois points lumineux, en c des rayons des deux points seulement, en κ des rayons d'un seul point; et les espaces κ seraient complètement dans l'ombre, comme les espaces extérieurs r .

Mais si l'on suppose que $\lambda' \lambda''$ est le diamètre d'un disque dont tous les points soient également lumineux, il y aura dans la chambre noire un grand faisceau $v v' \lambda \lambda'$ composé d'un nombre infini de faisceaux venant chacun d'un point différent, et le cercle dont $\lambda \lambda'$ est le diamètre se trouvera également éclairé dans tous ses points. Pour savoir, par exemple, quelle est la lumière qui arrive en κ , il faut alors regarder ce point comme le sommet d'un cône ayant pour base $v v'$, et tous les points du disque lumineux que ce cône prolongé vient envelopper donnent de la lumière au point κ , les autres n'en donnent pas.

Cette construction peut s'appliquer au disque du soleil; seulement, au lieu d'un faisceau conique, chaque point de cet astre envoie un faisceau parallèle (Fig. 560); $c c'$ est le faisceau envoyé par le centre, $\lambda \lambda'$ le faisceau envoyé par le bord supérieur, et $\lambda' \lambda''$ le faisceau envoyé par le bord inférieur. L'angle $\lambda \lambda' c$ ou son égal, $\lambda' c' \lambda''$ est de 32° environ, car c'est sous cet angle que nous apercevons le disque du soleil. Un point κ étant donné, sur une section $\lambda \lambda'$ du faisceau de la chambre

noire, il est facile, d'après ce que nous venons de dire, de déterminer quels sont les points du soleil dont il reçoit des rayons; et l'on calculerait aisément à quelle distance du volet le point central n cesse de recevoir les rayons des bords.

Les esprits les moins attentifs ne manquent pas d'observer une foule de phénomènes qui s'expliquent au moyen des notions précédentes. Nous en indiquerons ici quelques exemples.

1^o. Lorsqu'on fait entrer dans la chambre noire un faisceau de lumière solaire par une petite ouverture de forme quelconque, ce faisceau donne toujours une image parfaitement ronde, en tombant perpendiculairement sur un tableau à une distance suffisante du volet. Supposons, par exemple, que l'ouverture soit un carré abc (Fig. 561); chaque point du soleil donne dans la chambre noire un faisceau carré dont la section perpendiculaire est partout égale à abc , et pour avoir le contour de l'image, il suffit de concevoir que l'un de ces faisceaux tourne dans l'ouverture en s'appuyant sur les bords de l'astre. Ainsi, quand l'image sera reçue à une distance assez grande par rapport à la grandeur de l'ouverture, son contour extérieur sera toujours semblable au contour extérieur du corps lumineux, quelle que soit la forme de l'ouverture. Pendant une éclipse, l'image du soleil dans la chambre noire est tantôt annulaire, tantôt en forme de croissant, etc.; elle est toujours parfaitement semblable à la portion du disque qui n'est pas cachée. Des phénomènes analogues peuvent s'observer sous les ombrages des arbres touffus et élevés : les rayons qui passent entre les feuilles viennent peindre sur le sol des images *elliptiques* du soleil, quand ils tombent obliquement, et des images rondes, quand ils tombent perpendiculairement; au moment des éclipses ces images prennent aussi différentes formes suivant l'obliquité du sol.

2^o. Pendant une belle nuit, toutes les étoiles qui brillent dans la voûte du ciel, vont peindre leurs images dans l'intérieur d'une chambre noire dont l'ouverture est très petite. Chaque étoile, en effet, donne un faisceau parallèle, dont toutes les sections parallèles au volet sont égales à l'ouverture; ces faisceaux, en tombant sur une surface blanche avec des obliquités différentes, donnent des images dont le contour et la grandeur sont faciles à déterminer.

3^o. Pendant le jour on distingue dans l'intérieur de la chambre noire, une image renversée du ciel, des nuages, de l'horizon et de tous les objets qui sont au devant de la petite ouverture. Chaque point d'un arbre, par exemple, envoie un faisceau sensiblement parallèle, dont la section est d'un millimètre si l'ouverture n'a qu'un millimètre de diamètre; ainsi, sur le mur ou sur le tableau de la chambre noire, les faisceaux aa' et bb' de deux points voisins (Fig. 563), se superposent en partie et d'autant plus que le tableau est plus près de

l'ouverture; tandis que les faisceaux $a'a'$ et $c'c'$ de deux points un peu éloignés se dégagent l'un de l'autre pour former des images distinctes de ces points. On aura donc une image renversée de l'ensemble qui sera toujours un peu confuse vers les bords, mais d'autant moins que l'ouverture sera plus petite et le tableau plus éloigné. On voit en même temps, sur la fig. 563, la cause du renversement.

514. Les notions précédentes peuvent nous donner une première idée du phénomène de la vision. L'œil, comme nous le verrons, est un appareil analogue à une chambre noire : l'ouverture de la pupille donne passage aux faisceaux de lumière, et le réseau verveux de la *rétiline* qui tapisse le fond de l'œil est comme le tableau sur lequel viennent se peindre les images; mais pour qu'un seul point d'un objet extérieur n'ébranle qu'un seul point de la rétiline, il y a, derrière la pupille, un corps de forme lentilleuse et presque solide, nommé *cristallin*, qui concentre les rayons d'un même faisceau et les fait converger tous exactement sur le même point de la rétiline. Ainsi, quand nous regardons un point éloigné, nous voyons chacun de ses points par deux cônes de lumière, opposés à leur base; le premier de ces cônes est *divergent*; son sommet est au point que l'on regarde, et sa base a pour largeur l'ouverture de la pupille; le deuxième est *convergent*, et pour que la vision soit parfaitement nette son sommet doit tomber exactement sur la pupille. Quand nous regardons un objet plus ou moins étendu, le même phénomène se produit pour chacun des points visibles de sa surface. C'est par cette disposition organique, si simple dans son principe et si merveilleuse dans ses détails, que tous les objets du plus vaste paysage viennent dans un instant imperceptible se peindre à la fois sur la rétiline, avec toutes les variétés de leurs formes et tout l'éclat de leurs couleurs.

Comme nous jugeons de la situation d'un point dans l'espace par le lieu de son image sur la rétiline et par la direction que nous donnons à l'œil pour la recevoir, il en résulte que par une habitude constante nous supposons toujours que le point dont les rayons nous affectent est situé au sommet extérieur du cône qui peut *directement* donner naissance au cône intérieur de lumière. Ce principe habituel de nos jugemens est la source de toutes les *illusions* d'optique qui tiennent à la situation des objets. Ainsi, le point a (Fig. 564), fait son image au point a' au moyen des deux cônes opposés $aa'r'$ et $aa'r$; mais si la lumière, au lieu de venir à l'œil en ligne droite, se trouve brisée ou déviée par quelque cause, un point placé en s , par exemple, ou en e pourrait donner naissance au même cône intérieur $aa'r'$ et à la même image a' , et alors nous jugerions fausement que ces points sont a , sans qu'il y ait aucun donnée pour faire cesser notre illusion, car, les faisceaux de lumière des points c et s , venant enfin se confondre dans leur direction

avec le faisceau qui serait parti du point *a*, rien ne peut nous avertir des divers changemens de route qu'ils ont pu subir. Il est donc vrai de dire que, par l'organe de la vue, nous jugeons toujours en ligne droite, et que nos jugemens sont inévitablement sans toutes les fois que la lumière éprouve la plus légère déviation contre l'objet qui l'envoie et l'œil qui la reçoit.

515. *La lumière se propage avec une si grande vitesse, qu'elle vient du soleil à la terre en 8' 13".* — C'est par l'observation des éclipses du premier satellite de Jupiter que Roemer fut conduit à cette importante découverte, en 1673 et 1676; car il ne fallut pas moins d'une année pour la bien constater. La fig. 562 pourra donner une idée de ces observations. *s* est le lieu du soleil, *T A S M C* l'orbite de la terre et *s* la position de Jupiter. Supposons que Jupiter soit dans le plan de l'écliptique comme il est représenté dans la figure, qu'il resto immobile pendant une révolution entière de la terre, et que le premier satellite tourne dans le cercle *E I G K*; ce cercle, le diamètre de Jupiter et le cône d'ombre qu'il projette derrière lui sont ici fort simplifiés. Pendant une moitié de l'année, quand la terre parcourt la partie *T A S S* de son orbite, nous pouvons observer les émersions du premier satellite, c'est-à-dire, le moment où il sort de l'ombre, et pendant l'autre moitié nous pouvons observer ses immersions, c'est-à-dire le moment où il se plonge dans l'ombre. L'intervalle de deux immersions ou de deux émersions successives est la durée d'une révolution. Quel que soit le point de l'orbite de la terre d'où l'on fasse les observations, cette durée est toujours de 42^h 28' 35" ou environ 42^h 1/2. Par conséquent, si du point *a*, par exemple, on observe une émersiou, à un instant donné on peut prédire que la 100^e émersiou suivante aura lieu précisément après 100 fois 42^h 28' 35", et qu'elle sera vue du point *s* où le globe de la terre sera alors parvenu par son mouvement de translation. Or, on trouve par expérience qu'elle arrive toujours un peu plus tard, et l'on en conclut que la différence est le temps que met la lumière pour passer de *a* en *s*; on en déduit la vitesse de propagation, en divisant la distance connue *a s* par le retard observé. Cette conclusion se trouve vérifiée pendant la seconde moitié de l'année; car si l'on observe une immersion du point *c*, par exemple, la 100^e immersion suivante devrait avoir lieu après 100 fois 42^h 28' 35", quand le globe de la terre serait parvenu en *n*. Or, on trouve par expérience qu'elle arrive un peu plus tôt, et cette avance est précisément le temps que met la lumière pour passer de *c* en *e*. C'est par des observations semblables et souvent répétées que l'on a pu constater enfin que la lumière parcourt en 1" près de 80,000 lieues ou 79,572 lieues de 2000 toises et qu'elle met 8 13" à venir du soleil à la terre.

Il est facile d'après cela de calculer le temps que

met la lumière pour aller du soleil aux diverses planètes. Voici le tableau des résultats :

Planètes.	Distance moyenne des planètes au soleil en lieues de 2000 toises.	Temps que met la lumière pour aller du soleil aux planètes.
Mercure.	16,188,465	0 ^h 3' 10"
Vénus.	28,375,600	0 5 56
Mars.	59,772,900	0 12 31
Vesta.	92,705,600	0 19 25
Junon.	104,755,000	0 21 57
Cérès.	108,555,500	0 22 44
Pallas.	108,738,000	0 22 46
Jupiter.	204,100,280	0 42 45
Saturne.	374,196,340	1 18 23
Uranus.	752,540,172	4 0 48

Le temps que la lumière emploie pour venir, par exemple, d'Uranus à la terre est tantôt moindre, tantôt plus grand que 4^h 0' 48", suivant les positions relatives de ces deux planètes; mais on peut dire, sans trop s'écarter de la vérité, que l'astronome qui regarde le globe d'Uranus ne le voit pas où il est, mais où il était 4^h auparavant, et que si cette planète était anéantie à un instant donné, on la verroit encore pendant 4^h après qu'elle aurait cessé d'être.

Nous ne savons pas à quelle distance de la terre sont dispersées les étoiles, mais nous savons avec certitude qu'il n'y a pas un de ces astres qui ne soit au moins à 200,000 fois la distance du soleil à la terre, et dont la lumière, par conséquent, ne mette pour arriver à nous au moins 200,000 fois 8' 13", c'est-à-dire, 1141 jours ou 3 ans et 45 jours, et, sans doute, il n'y a pas d'exagération à supposer que nous voyons des étoiles qui sont quelques centaines de millions de fois plus éloignées et dont la lumière met par conséquent quelques millions de siècles à venir jusqu'à nous. Tout ce qui existe dans le ciel, au delà de notre système, pourrait être brisé, confondu, anéanti, et nous, habitans paisibles de la terre, nous passerions encore de nombreuses années à contempler comme aujourd'hui ce grand spectacle d'ordre et de magnificence qui ne serait plus alors qu'une illusion trompeuse, une image sans réalité.

La matière pondérable parait par sa nature n'être pas susceptible d'un mouvement aussi rapide que le mouvement de la lumière. Les plus grandes vitesses que nous puissions observer à la surface de la terre, sont celles qui résultent de l'explosion des poudres fulminantes, ou des actions mécaniques les plus violentes. Or, un boulet qui sort du canon parcourt tout au plus deux ou trois mille pieds par seconde, c'est-à-dire, qu'en conservant toute sa vitesse il ferait en un beaucoup moins de chemin que la lumière en 1". Si nous passons du mouvement de petites masses pondérables à celui des grandes masses qui composent les corps célestes, nous reconnaitrons facilement que de tous les astres de notre système, c'est Mercure qui a le mouvement de translation le plus rapide, et cependant

son centre ne parcourt que 12 lieues et $\frac{3}{10}$ en t". Le centre de Vénus fait 9 lieues, 15, et celui de la terre 7 lieues, 74. Pour les vitesses qui résultent des mouvemens de rotation autour de l'axe, ce sont les points de l'équateur de Jupiter qui reçoivent la plus grande, et ils ne parcourent en t" que 3 lieues, 1. Ainsi, sur la terre et sur les autres planètes, par l'action des forces artificielles les plus promptes et par celle des forces naturelles les plus puissantes, la matière pondérable ne peut recevoir qu'une vitesse qui est toujours cinq ou six mille fois moindre que la vitesse de la lumière. Ce résultat nous annonce d'une manière assez frappante que, si la

lumière est un mouvement, elle est sans doute le mouvement d'une substance essentiellement différente de la matière pondérable.

§16. Pour entrer maintenant dans l'étude de l'optique, c'est-à-dire, dans l'étude des modifications diverses que les corps peuvent imprimer à la lumière, nous distinguerons les propriétés qui sont relatives seulement à la direction des faisceaux lumineux, et celles qui sont essentielles aux rayons eux-mêmes et indépendantes de leur direction. Nous étudierons la première partie sous le titre général de *lumière non polarisée*, et la deuxième sous le titre de *lumière polarisée*.

PREMIÈRE PARTIE.

LUMIÈRE NON POLARISÉE.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA CATOPTIQUE OU DE LA RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE.

517. *De la réflexion de la lumière sur une surface plane.* — Lorsqu'on fait tomber dans la chambre noire un faisceau de lumière solaire $11'$ (Fig. 565), sur un miroir poli de métal $11''$, on observe en général deux phénomènes remarquables : 1° on distingue dans une direction déterminée un faisceau $11'$ qui semble partir du miroir et qui trace sur les corps qu'il rencontre une image brillante du soleil ; tous les rayons de ce faisceau sont des rayons *régulièrement* réfléchis ; ils ont d'autant plus d'éclat que le miroir est mieux poli ; 2° des divers points de la chambre noire on distingue la portion du miroir sur laquelle tombe la lumière ; les rayons $11', 11'', 11'''$, etc., qui sont ainsi dispersés dans tous les sens, sont des rayons *irrégulièrement* réfléchis ; ils ont d'autant plus d'éclat que le miroir est moins poli.

Pour rendre l'expérience plus frappante on peut diriger sur le miroir le souffle de l'haleine ou former près de la surface un petit nuage de poussière, en secouant une éponge remplie de poudre de lycopode ou de craie pulvérisée.

L'angle $111'$ qu'un rayon incident 11 fait avec la normale 11 au point d'incidence 1 se nomme *angle d'incidence*.

L'angle $111''$ qu'un rayon réfléchi $11'$ fait avec la normale 11 au point d'incidence se nomme *angle de réflexion*.

Le plan formé par l'angle d'incidence se nomme *plan d'incidence*.

Le plan formé par l'angle de réflexion se nomme *plan de réflexion*.

Ces définitions s'appliquent à tous les rayons incidents et réfléchis ; mais nous ne devons nous occuper en ce moment que de la *réflexion régulière*, et voici les lois suivant lesquelles elle s'accomplit.

1°. *Le plan de réflexion coïncide avec le plan d'incidence.*

2°. *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence et situé de l'autre côté de la normale.*

Ces deux vérités fondamentales peuvent être démontrées par une seule expérience que les astro-

nomes ont occasion de répéter souvent et avec des instruments d'une grande précision.

Autour du centre c (Fig. 568), d'un grand cercle vertical vv' , se meut une lunette l avec laquelle on observe les étoiles. D'abord, on fait une observation par la lumière directe 11 , ensuite on en fait une autre par la lumière $11'$ qui est réfléchie sur la surface tranquille d'un vase plein de mercure, et l'on trouve constamment que l'angle ncr est égal à l'angle $pc'o'$. Or, les verticales pc et $11'$ étant parallèles, ainsi que les rayons 11 et $11'$ qui viennent d'une même étoile, il est évident que les angles pcr et $pc'o'$ sont respectivement égaux aux angles $111'$ et $111''$, et quo par conséquent ceux-ci sont égaux entre eux ; et il est évident en outre que le plan d'incidence $111'$ coïncide avec le plan de réflexion $111''$.

Il n'est pas nécessaire de prouver directement que le rayon 11 provient de $11'$, puisqu'au point 1 il ne peut tomber qu'un rayon parallèle à 11 .

Au lieu d'une lunette adaptée au cercle on pourrait se servir, comme les anciens astronomes, d'un simple *tube droit* (Fig. 566), ou d'une *alidade* (Fig. 567), portant deux *pinules* dont les trous v et v' fussent sur une ligne exactement parallèle au *limbe* du cercle vv' .

Ces deux lois de la réflexion sont tout-à-fait générales et ne souffrent aucune exception ; elles sont vraies pour la lumière naturelle qui nous vient des astres et pour la lumière artificielle que nous pouvons produire par la combustion, par les actions chimiques, la phosphorescence, l'électricité, etc. Elles sont vraies pour la lumière directe et pour la lumière diffuse qui nous fait voir les corps et toutes leurs couleurs diverses ; enfin elles sont complètement indépendantes de la nature des substances sur lesquelles la réflexion s'opère, car elles se vérifient avec la même exactitude, sur les métaux et les pierres précieuses, sur les solides et les liquides, en un mot sur toutes les surfaces réfléchissantes, quelle que puisse être la matière pondérable qui les compose.

Au moyen de ces principes il est facile de dé-

montrer que les miroirs plans doivent nous faire voir des images des objets, et que ces images sont toujours *symétriques* des objets par rapport au plan du miroir.

En effet, soit m un miroir plan (Fig. 569), et l un point lumineux; du point l abaissons sur la surface du miroir on sur son prolongement une perpendiculaire lk que nous prolongerons d'une quantité égale à elle-même; le point l' qui la termine est *symétrique* du point l . Mais si nous menons une ligne $l'a$ en un point quelconque du miroir et une ligne $l'i$ au même point, les angles lik et $l'ik$ étant égaux, les angles lir et $l'ir$ le seront aussi, donc lir opposé par le sommet à $l'ir$ sera égal à lir ; aussi, le rayon qui tombe suivant li doit se réfléchir suivant le prolongement de $l'i$. Ce qui est vrai pour ce rayon est vrai pour tous les autres, donc enfin tous les rayons du faisceau réfléchi à a s'en vont dirigés comme s'ils partoient du point l' qui est le point symétrique du point l .

Supposons maintenant que l'on place l'œil quelque part en o dans le faisceau réfléchi, et que pp' représente l'ouverture de la pupille. Le petit pinceau de lumière qui tombe dans la pupille est exactement dirigé comme s'il venait du point l' ; ainsi par ce pinceau l'œil voit le point lumineux en l' sans soupçonner que la lumière vient du point l et qu'elle a été brisée par la réflexion en li .

Ce raisonnement s'appliquant à chacun des points d'un corps lumineux quelconque, il en résulte que la flamme d'une bougie, par exemple, qui est située en s (Fig. 570) doit être vue en s' , car le sommet s est vu en s' , le point s en s' , la point s en s' , etc. Les corps qui ne sont pas lumineux, mais simplement éclairés, présentent les mêmes phénomènes, parce que la lumière qui est irrégulièrement réfléchi sur chacun des points de leur surface se propage comme si elle était immédiatement produite par ces points.

Les images ne sont donc pas *renversées*, comme on le dit quelquefois, mais elles sont *symétriques* des objets; ce qui est très différent.

Pour construire, en général, une image symétrique d'un corps par rapport à un plan, il faut de tous les points de ce corps abaisser des perpendiculaires sur le plan, et prolonger chacune d'une quantité égale à elle-même; l'ensemble des extrémités de ces perpendiculaires prolongées forme l'image symétrique.

S'il existait des surfaces réfléchissantes parfaitement polies, l'œil ne pourrait ni les distinguer ni même en soupçonner l'existence; car les corps ne sont perceptibles à distance que par les rayons irrégulièrement réfléchis à leur surface, et tous les rayons régulièrement réfléchis font voir les points lumineux d'où ils sont sortis et non pas les réflecteurs sur lesquels ils tombent. Si le globe de la lune, par exemple, était poli comme la surface d'un globe de mercure, nous ne pourrions pas la voir

en le regardant, mais nous verrions seulement l'image du soleil qui l'éclaire.

Dans le même milieu parfaitement homogène, la lumière peut se mouvoir indéfiniment sans éprouver la moindre réflexion régulière; mais toutes les fois qu'elle se présente pour passer d'un milieu dans un autre, elle éprouve à la surface de séparation de ces milieux une réflexion régulière plus ou moins abondante.

Ce passage d'un milieu dans un autre est la seule condition nécessaire et toujours suffisante pour que la réflexion s'accomplisse. Mais il faut bien entendre qu'une même substance n'est pas essentiellement un même milieu à l'égard de la lumière; dans une masse de verre, par exemple, il peut se trouver des couches contiguës où les molécules offrent des arrangements différens; alors la lumière éprouve une réflexion partielle en passant de l'une dans l'autre. Il en est de même dans les masses fluides, et un pinceau de lumière solaire éprouve un nombre infini de réflexions partielles, avant d'arriver jusqu'à nous, parce qu'il traverse successivement dans l'atmosphère un nombre infini de couches contiguës dont les densités sont différentes.

Si la direction de la lumière réfléchi est déterminée avec une précision géométrique, il n'en est pas de même de son intensité. Sur ce point difficile dont nous nous occuperons à la fin de l'optique, on sait seulement :

1° Que la quantité de lumière régulièrement réfléchi va croissant avec l'angle d'incidence, sans toutefois être nulle quand cet angle est nul;

2° Qu'elle dépend du milieu dans lequel la lumière se meut et du milieu sur lequel elle tombe;

3° Qu'elle est très différente pour des corps de différente nature qui sont placés dans les mêmes circonstances.

Nous citerons quelques exemples à l'appui de ces résultats généraux pour les faire mieux comprendre.

En regardant la flamme d'une bougie par réflexion sur un morceau de verre dépoli, on ne distingue pas son image quand l'angle d'incidence est très petit, mais on la distingue assez nettement quand cet angle est très grand. On peut même alors la distinguer sur un morceau de bois, eu d'étoffe, ou même sur un morceau de papier noiré au noir de fumée. Ces expériences prouvent en même temps que tous les corps réfléchissent régulièrement une certaine proportion de la lumière qu'ils reçoivent, et que cette proportion va croissant avec l'obliquité des rayons.

Les fragmens de verre poli sont à peine visibles quand ils sont plongés dans l'eau ou dans l'huile, et ils ne donnent alors par réflexion que des images très obscures des objets, parce qu'au contact de ces fluides la surface du verre réfléchit moins de lumière qu'au contact de l'air.

En disposant parallèlement à côté l'une de l'autre des surfaces liquides et des substances également polies, on distingue une grande différence dans l'éclat des images qu'elles réfléchissent sous la même obliquité; le mercure et l'acier, par exemple, donnent des images bien plus éclatantes que l'eau, l'alcool ou le verre.

518. *Goniomètre de Wollaston.* — Les lois de la réflexion de la lumière ont été appliquées à la mesure des angles dièdres des corps polis et particulièrement des cristaux. Les appareils dont on se sert pour cet objet se nomment des *goniomètres*; nous décrirons ici la construction du goniomètre de Wollaston comme étant l'un des plus ingénieux et des plus commodes que l'on ait imaginés.

Cet appareil est représenté dans la figure 574; il se compose d'un cercle vertical en cuivre $v v'$, porté sur un pied pp' et tournant autour de son centre sur l'axe horizontal aa' . Cet axe est lui-même percé dans sa longueur pour donner passage à un axe plus petit aa' ; le frottement qui existe entre eux est assez grand pour que le mouvement de l'un entraîne l'autre s'il n'est arrêté. L'axe aa' est terminé d'un côté par un bouton et de l'autre par un système de pièces qui peuvent exécuter trois mouvements rectangulaires. Le cristal dont on veut mesurer l'angle s'ajuste avec de la cire molle sur l'extrémité e de la pièce g que l'on peut appeler la *queue* de l'appareil.

On dispose le goniomètre sur une table solide à 15 ou 20 pas d'une fenêtre ou d'un objet qui présente au moins deux lignes horizontales n et n' , la première étant un peu plus élevée que la seconde. L'axe doit être à peu près parallèle à ces lignes et le limbe très exactement vertical. Alors on approche l'œil et l'on tourne le cristal jusqu'à ce que l'on aperçoive sur l'une de ses faces l'image de la ligne n . Ensuite on fait des essais en tournant le cristal ou les pièces qui le portent, jusqu'à ce que cette image soit horizontale; c'est une condition indispensable, et l'on parvient à la remplir exactement en regardant à la fois l'image dont il s'agit, et la ligne n' qui n'est là que pour servir de vérification (Fig. 573). Cela fait, on est assuré que cette première face du cristal est horizontale, et l'on amène la seconde face pour la soumettre à la même condition, en combinant les divers mouvements des pièces mobiles. Enfin, l'on tourne l'axe aa' pour amener successivement chacune des faces du cristal devant l'œil et vérifier ainsi l'horizontalité de leur arête commune; car cette arête sera horizontale si par le seul mouvement de l'axe aa' , l'image de la ligne n est horizontale sur la première comme sur la seconde face. Alors, on met le zéro du limbe divisé $v v'$ sur le repère fixe r , on tourne de nouveau l'axe aa' pour faire coïncider l'image réfléchie de n avec l'image directe de n' , et sans toucher à l'axe aa' , on fait tourner le limbe jusqu'à ce que l'image de n vienne se réfléchir sur la seconde face et de nouveau coïncider avec n' . L'arc

décrit par la limbe est le supplément de l'angle dièdre du cristal.

519. *Réflexion sur deux plans parallèles.* — Le point r (Fig. 571) se trouve entre deux miroirs parallèles m et m' , et l'œil, placé en e , aperçoit derrière le miroir m un grand nombre d'images dont on peut facilement se rendre compte. Les rayons qui tombent directement sur m forment une image en a ; ceux qui tombent directement sur m' forment une image en a' . Ces derniers rayons, après leur réflexion, sont donc comme s'ils partaient du point a' , et en venant tomber sur le miroir m ils forment une image qui se trouve en s (le point s étant symétrique (517) de a' par rapport à m). Derrière m' il y a pareillement une image en c (le point c étant symétrique de a par rapport à m'). Les rayons qui ont éprouvé une première réflexion sur m et une deuxième réflexion sur m' reviennent donc de nouveau en m ; ils sont comme s'ils partaient du point c , et donnent par conséquent une image en b (le point b étant symétrique de c par rapport à m), etc.

On comprend comment les réflexions successives font apercevoir un nombre indéfini d'images de plus en plus sombres et espacées suivant une certaine loi qu'il serait facile d'exprimer algébriquement.

Si l'on voulait distinguer parmi les images celles qui résultent d'une première réflexion sur m et celles qui résultent d'une première réflexion sur m' , on pourrait placer entre les miroirs un corps qui serait rouge, par exemple, du côté de m , et bleu du côté de m' ; alors d'un côté toutes les images seraient alternativement rouges et bleues et de l'autre alternativement bleues et rouges.

520. *Réflexion sur deux miroirs inclinés.* — Les phénomènes précédents se reproduisent entre deux miroirs inclinés, avec cette différence que le nombre des images visibles est alors dépendant de l'angle des miroirs. Il suffira d'examiner le cas où les miroirs font entre eux un angle droit; $m c$ (Fig. 572) représente la coupe du premier, et $m' c$ celle du second; du point c de leur intersection commune on a décrit une circonférence de cercle $a m m'$. Un objet placé en a fait une image en s par la réflexion sur $m c$, et une image en s' par la réflexion sur $m' c$; de plus, les rayons qui ont subi une première réflexion sur $m c$ et qui retombent sur $m' c$ donnent une image en b (le point b étant symétrique de s par rapport à $m' c$) et ceux qui ont subi une première réflexion sur $m' c$ et qui retombent sur $m c$ donnent une image au même point s (puisque ce point est aussi le symétrique de s' par rapport à $m c$). Il en résulte que si l'on place l'œil à l'un des bouts des miroirs et près de leur intersection commune pour recevoir en même temps les rayons directs et ceux qui ont éprouvé une ou deux réflexions, on verra quatre images du point a , savoir l'image directe en a , puis les images réfléchies en s , s' et b .

C'est sur ce principe que l'on construit le ka-

lédoscope, instrument ingénieux, imaginé par M. Brewster, et qui est maintenant employé avec succès dans plusieurs arts, pour obtenir des dessins bizarrement variés et cependant toujours symétriques.

Pour avoir, par exemple, 5, 6... 20 images du même point, il suffit de donner à l'angle des miroirs $1/5$, $1/6$... $1/20$ de circonférence; mais si cet angle était, par exemple, $8/100$ au lieu de $8/100$ il est facile de voir qu'il n'y aurait plus de symétrie dans les images.

521. *Réflexion sur les miroirs courbes.* — On adopte en optique ce principe fondamental, que la réflexion se fait en un point quelconque d'une surface courbe, comme elle se ferait sur le plan tangent en ce point. Nous verrons tout à l'heure que ce principe est en effet confirmé par de nombreuses expériences, mais l'en pourrait aussi le démontrer directement par la théorie. Il en résulte que les lois générales, dont nous avons établi l'exactitude (517), s'appliquent sans restriction à toutes les surfaces, quelle que soit leur courbure, et que tout se réduit à trouver pour chaque point la direction du plan tangent ou de la normale, ce qui est simplement un problème de géométrie.

Ainsi, un point lumineux, placé au centre d'une sphère creuse et polie à l'intérieur, enverrait des rayons sur tous les points de la surface, et chacun de ces rayons serait réfléchi sur lui-même et reviendrait directement au centre après la réflexion. De même, un point lumineux placé à l'un des foyers d'un ellipsoïde enverrait des rayons sur tous les points de la surface, et tous ces rayons iraient par les réflexions se réunir et se concentrer en l'autre foyer; puis en continuant leur route, ils retourneraient au premier foyer après une seconde réflexion, reviendrait au second foyer après une troisième et ainsi de suite.

Un point lumineux placé au foyer d'un paraboloïde enverrait des rayons qui seraient tous réfléchis parallèlement à l'axe et s'en iraient se perdre à l'infini; réciproquement, un point placé à l'infini comme une étoile, et sur l'axe d'un paraboloïde, enverrait des rayons qui viendraient tous se concentrer au foyer.

C'est par des considérations analogues que l'on peut expliquer les irrégularités et les accidents singuliers que présentent les images des objets lorsqu'elles sont réfléchies par des surfaces courbes. Par exemple, l'image d'une étoile n'est qu'un point brillant lorsqu'on la regarde par réflexion sur la surface d'une eau tranquille, et elle devient une longue traînée lumineuse ou une grande tache brillante entourée de mille manières lorsqu'on la regarde par réflexion sur une surface ondulée. La ligne menée de l'œil à l'étoile peut être prise pour l'axe d'une multitude de paraboloïdes dont l'œil est le foyer, et, dans le premier cas, un seul de ces paraboloïdes pouvant être tangent à la surface

plane réfléchissante, en n'a qu'une seule image de l'étoile qui est formée par la lumière réfléchie au point de tangence; dans le second cas, un grand nombre de ces paraboloïdes peuvent être tangents en divers points de la surface courbe réfléchissante, et alors on voit autant d'images, chacune étant formée par la lumière qui se réfléchit en l'un des points de tangence.

Quand l'objet n'est pas à l'infini, il faut construire des ellipsoïdes dont l'objet et l'œil sont les deux foyers.

522. *Réflexion sur les miroirs sphériques.* — Nous devons discuter en détail la réflexion de la lumière sur les surfaces sphériques, parce qu'elle est le principe de la construction de plusieurs instruments qui sont d'un grand intérêt pour la science.

Si l'on imagine une sphère dont l'intérieur soit très poli et qu'on la coupe par un plan, on en détache une calotte qui est un *miroir sphérique concave*. Ce serait un *miroir sphérique convexe* si la sphère était polie en dehors.

L'ouverture du miroir est l'angle des deux rayons ca et ca' menés aux bords opposés de la calotte (Fig. 576); cet angle ne doit pas dépasser 20 ou 30°.

Le diamètre du miroir est la ligne aa' qui joint deux bords opposés de la calotte.

L'axe du miroir est la ligne ac menée du centre de la calotte au centre de la sphère.

Le point a s'appelle aussi le *centre de figure* du miroir et le point c son *centre de courbure*.

On démontre par le calcul, et l'on peut constater aisément par une construction graphique, que tous les rayons de lumière envoyés sur le miroir, par un point quelconque t de l'axe, vont après la réflexion concourir en un même point r qui est aussi placé sur l'axe (Fig. 576).

Ce phénomène n'a lieu toutefois que dans les miroirs bien travaillés, dont l'ouverture ne dépasse pas 20 ou 30°. Si l'ouverture était plus grande, les rayons qui tomberaient en s , par exemple, ne viendraient plus concourir en r ; l'image ne serait plus nettement terminée, et il y aurait alors ce qu'on appelle une *aberration de sphéricité*.

Le point r se nomme le *foyer* du point t , et ces deux points considérés relativement se nomment *foyers conjugués*, parce qu'il est évident que si le point lumineux était en r il formerait son foyer en t .

Les mêmes démonstrations et les mêmes conséquences s'appliquent à un point t' situé hors de l'axe d'une manière quelconque; seulement, il faut alors, par ce point et par le centre de courbure c , mener une ligne ct' et ct' que l'on nomme *axe secondaires*, et c'est à l'égard de cet axe secondaire que les phénomènes se produisent; c'est-à-dire que les points t' et r' sont situés sur lui comme les points t et r l'étaient tout à l'heure sur l'axe principal.

Cependant il importe de remarquer que les points

situés hors de l'axe principal sont soumis à une restriction : quand l'axe secondaire qui leur correspond fait avec l'axe principal un angle plus grand que *dix ou quinze degrés*, leurs images ne sont plus régulières et nettement définies, et il y a une aberration de sphéricité, comme si la miroir avait trop d'ouverture. On dit alors que ces points sont hors du *champ* du miroir.

Quand le point lumineux s'éloigne du miroir, son foyer s'en approche et *vice versa*. Les lois suivant lesquelles ces changements s'opèrent constituent toute la théorie des miroirs ; elles sont heureusement exprimées par une formule très simple que nous allons discuter.

Cette formule est la suivante :

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}$$

x , rayon de courbure du miroir ; ainsi cette quantité reste constante pour le même miroir.

y , distance du point lumineux ou de l'objet au miroir.

z , distance du foyer ou de l'image au miroir.

Ces distances sont toujours comptées sur l'axe principal ou sur l'axe secondaire correspondant au point lumineux. Ainsi dans la *fig. 576*, pour le point z on aurait $x = z$ et $y = r$; et pour le point z' on aurait $x = z'$ et $y = r'$.

Voici le tableau des valeurs les plus remarquables que l'on peut donner à x et des valeurs correspondantes de z .

$$\begin{array}{ll} 1^{\circ} \dots x = \infty ; \dots z = \frac{a}{2} \\ 2^{\circ} \dots x = 100 a ; \dots z = \frac{100 a}{199} \\ 3^{\circ} \dots x = 2 a ; \dots z = \frac{2 a}{3} \\ 4^{\circ} \dots x = a ; \dots z = a \\ 5^{\circ} \dots x = \frac{a}{2} ; \dots z = \infty \\ 6^{\circ} \dots x < \frac{a}{2} ; \dots z = \text{valeur négative.} \end{array}$$

1^o Quand x a une valeur infinie, tous les rayons sont parallèles ; on a $x = \infty$, c'est-à-dire que le

foyer est alors à la moitié du rayon (*Fig. 576*). Ce foyer se nomme *foyer principal*, et sa distance au miroir *distance focale principale*.

La *fig. 577* représente la marche des rayons pour un faisceau parallèle et oblique à l'axe du miroir.

$$\begin{array}{l} 2^{\circ}. \text{ Pour } x = 100 a, \text{ on a } z = \frac{100 a}{199} \text{ ou bien} \\ \frac{a}{2} + \frac{a}{398} ; \text{ comme } \frac{a}{399} \text{ est en général une quantité} \end{array}$$

très petite, il suffit que la distance de l'objet au miroir soit égale à 100 fois le rayon, pour que l'image se fasse sensiblement au foyer principal.

3^o. Pour $x = 2 a$, on a $z = \frac{2 a}{3}$; ainsi, pendant que l'objet se rapproche du miroir depuis l'infini jusqu'à une distance double du rayon, l'image n'éprouve qu'un petit déplacement, puisqu'elle s'éloigne seulement depuis $\frac{a}{2}$ jusqu'à $\frac{2 a}{3}$.

4^o. Pour $x = a$ on a $z = a$, ce qui doit être, puisque tous les rayons envoyés du centre doivent revenir au centre.

5^o. Pour $x = \frac{a}{2}$ on a $z = \infty$; c'est-à-dire qu'en mettant le point lumineux au foyer, tous les rayons réfléchis forment alors un faisceau parallèle et ne vont se rencontrer qu'à l'infini (*Fig. 576* et *577*) ; ce qui doit être puisque l'infini et le foyer principal sont deux foyers conjugués.

6^o. Quand x est plus petit que $\frac{a}{2}$, c'est-à-dire

quand le point lumineux est plus près du miroir que le foyer principal, z prend alors une valeur négative ; cela ne veut pas dire que les rayons réfléchis ne se rencontrent plus, mais seulement qu'ils se rencontreraient si on les prolongeait derrière le miroir (*Fig. 578*). Le foyer z se nomme alors *foyer virtuel*, parce que les rayons n'y passent pas en réalité, bien qu'ils soient dirigés comme s'ils y passaient.

Il résulte de cette discussion que si un objet ab (*Fig. 579 bis*), était disposé sur une surface sphérique ayant le même centre c que le miroir, il formerait en m sa *image renversée* qui en serait l'exacte représentation ; on aura une idée du rapport de grandeur qui existe entre l'image et l'objet, si l'on remarque que du centre du miroir ils seraient l'un et l'autre vus sous le même angle.

Si tous les points d'un objet n'étaient pas à la même distance du centre, tous les points de son image n'en seraient pas non plus à la même distance.

Tous ces résultats se trouvent vérifiés par les expériences suivantes :

Un large faisceau de lumière solaire tombant sur le miroir mn (*Fig. 576* et *577*), on voit une petite image resplendissante du soleil ou r ou en r' , suivant que le faisceau incident est parallèle ou oblique à l'axe. Le soleil étant vu de la terre sous un angle d'environ $30'$, son image regardée du centre c serait vue sous le même angle. Ainsi sa grandeur absolue dépend du rayon du miroir ; par exemple, un foyer du grand réflecteur d'Herschell, qui a 80 pieds de rayon, l'image du soleil a environ 3 pouces de diamètre, et elle n'a guère que 3 lignes au foyer d'un miroir de 6 pieds de rayon, et

3 millimètres au foyer d'un miroir de 1 mètre de rayon. Grande ou petite, cette image a un très vif éclat; dans l'espace circonscrit qu'elle occupe se trouvent concentrées à la fois toute la lumière et toute la chaleur du faisceau incident.

On peut se servir de cette expérience pour déterminer le rayon de courbure d'un miroir donné; mais alors il faut en couvrir la surface avec un morceau d'étoffe ou de papier dans lequel on laisse seulement deux ouvertures près des bords en v et v' (Fig. 579); car, il est bien plus facile de déterminer exactement le point de rencontre des petits faisceaux v et v' , que celui où l'image complète du soleil a le plus petit diamètre et la plus grande netteté.

On reconnaît aisément que des objets éloignés d'environ 100 fois le rayon du miroir font leur image à très peu près au même point que le soleil.

En promenant la flamme d'une bougie dans une chambre noire, à diverses distances devant le miroir, sur l'axe ou hors de l'axe, il est facile de vérifier tous les autres résultats du calcul que nous avons indiqués; son image se reçoit sur un petit écran de papier ou sur un morceau de verre dépoli; si l'écran était trop large, il arrêterait une trop grande partie des rayons incidents qui arrivent au miroir.

Les miroirs concaves ne donnent que des foyers *virtuels* ou des images *virtuelles*.

La formule précédente devient pour ces miroirs :

$$\frac{1}{x} = \frac{2}{r} + \frac{1}{s}$$

Les valeurs de s et de s' étant essentiellement positives, les valeurs de x seront toujours négatives, et comme elles sont comptées à partir du point a , c'est une preuve que le foyer tombe toujours derrière le miroir de a vers c ; ainsi le foyer n'est jamais produit par la *rencontre réelle* des rayons, mais par leur *rencontre virtuelle* ou par la rencontre de leurs prolongements.

Pour $s = \infty$ on a $x = -\frac{r}{2}$, c'est la plus grande valeur négative de x , figure 580.

$$\text{Pour } s = s \text{ on a } x = -\frac{s}{3}$$

Enfin pour $s = 0$ on a $x = 0$.

On peut aussi vérifier ces résultats par l'expérience en couvrant un miroir convexe avec un carton percé de deux trous et en suivant la direction des petits faisceaux réfléchis pour déterminer le point où leurs prolongements vont se couper derrière le miroir (Fig. 581.)

523. *Miroirs coniques et cylindriques.* — Nous ne citerons ces miroirs que pour donner une idée de la marche des rayons qui sont réfléchis à leur surface et des illusions plus ou moins singulières qui en peuvent résulter.

aa' (Fig. 582), est la coupe d'un miroir conique dont la surface latérale extérieure est très polie. On le pose par sa base en baa' (Fig. 583), au milieu d'un carton circulaire $CART$, sur lequel on dessine, suivant certaines lois, des figures bizarres que l'on appelle *anamorphoses*. L'œil placé en O un peu au-dessus du sommet du cône (Fig. 582), aperçoit par réflexion une figure régulière résultant des traits déformés qui sont tracés sur le carton, par exemple, la fig. 583 fait voir l'image régulière d'une clochette.

Pour se rendre compte de cette espèce d'illusion, il suffit de remarquer que le point c , par exemple (Fig. 582 et 583), sera par la réflexion son image en c' , et que les points compris entre a et c seront leurs images sur la ligne ac' . Ainsi tous les points de la circonférence $caat$ seront vus au seul point c' , tandis que tous les points des circonférences plus intérieures seront vus sur des circonférences de plus en plus grandes jusqu'à la circonférence baa' qui sera vue de sa grandeur.

Les miroirs cylindriques présentent des effets analogues dont on pourra facilement se rendre compte par les premières notions de géométrie et de perspective.

524. *Des caustiques.* — Quand les rayons envoyés par un seul point lumineux et réfléchis ensuite par une surface courbe continue quelconque ne se réunissent pas tous en un même foyer, il arrive toujours que les rayons voisins se rencontrent, et alors les points consécutifs où ils se coupent engendrent une surface que l'on nomme *caustique* ou *caustique par réflexion*. Quand la réflexion se fait sur une ligne et non pas sur une surface, la caustique est une simple ligne.

En supposant, par exemple, un point lumineux en t hors de la circonférence réfléchissante aa' (Fig. 584), la caustique formée par les rayons réfléchis serait la courbe $ttq'q'$; chaque rayon réfléchi est tangent en un point de cette courbe. On comprend par là pourquoi il ne faut pas donner trop d'ouverture aux miroirs sphériques, puisque les rayons qui tombent trop obliquement à l'axe, au lieu de concourir au foyer r , s'en vont concourir en des points de plus en plus éloignés à mesure que l'obliquité augmente.

La recherche de la forme des caustiques est un problème qui a exercé la sagacité de plusieurs habiles géomètres. M. Quételet a dernièrement publié sur ce sujet deux mémoires intéressants.

CHAPITRE II.

DIOPTRIQUES OU RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE.

525. *Lois générales de la réfraction de la lumière.*

La réfraction de la lumière est la déviation ou le changement de direction qu'elle éprouve en passant d'un milieu dans un autre. Tous les milieux dans lesquels la lumière peut se propager sont des milieux réfringents, parce que tous font changer de route aux rayons, à l'instant où ils entrent pour les traverser. Ainsi, l'on peut dire que le vide est lui-même un milieu réfringent, car la lumière se réfracte en sortant d'un corps pour entrer dans le vide. Au passage du verre dans le vide, ou de l'air dans l'eau, ou, en général, d'un milieu dans un autre, un rayon de lumière n'éprouve pas, sans doute, une déviation brusque et instantanée, comme une ligne géométrique qui se brise; il est probable qu'il se courbe et s'incline par degrés avant d'arriver à sa nouvelle direction rectiligne; mais si cette courbure se forme réellement, son étendue est si petite qu'il n'est jamais possible d'en constater l'existence. Nous représenterons donc les rayons réfractés comme de simples lignes brisées.

L'angle d'incidence i (Fig. 585) est ici, comme pour la réflexion, l'angle du rayon incident avec la normale au point d'incidence.

L'angle de réfraction r est l'angle du rayon réfracté ra , avec le prolongement rs' de la normale.

Le plan d'incidence et le plan de réfraction sont respectivement les plans des angles d'incidence et de réfraction. Un rayon incident ne donne naissance, en général, qu'à un seul rayon réfracté, cependant il existe des corps tels que le spath d'Islande, le cristal de roche et plusieurs autres cristaux, dans lesquels un seul rayon incident donne presque toujours naissance à deux rayons réfractés; ces phénomènes de double réfraction sont liés à la polarisation de la lumière que nous étudierons plus tard; pour le moment nous essaierons seulement d'établir les lois de la réfraction simple. Ces lois sont exprimées dans les deux propositions suivantes:

1°. Le plan de réfraction coïncide toujours avec le plan d'incidence.

2°. Le rapport des sinus d'incidence et de réfraction est constant pour les mêmes milieux.

La première de ces propositions ne présente aucune difficulté, mais nous allons prendre un exemple pour faire mieux comprendre la seconde.

Supposons que dans un vase en verre de forme

hémisphérique (Fig. 586), on verse de l'eau jusqu'à ce que le niveau x s'atteigne le centre c . Un petit pinceau de lumière solaire dirigé vers le centre fera un angle d'incidence i et r que l'on mesurera sur le cercle divisé xx' , et un angle de réfraction a et r' que l'on mesurera de même sur le contour du vase, car il sera facile de reconnaître le point par lequel il vient sortir pour repasser dans l'air. Le sinus du premier de ces angles est la perpendiculaire ib , le sinus du second est la perpendiculaire ar , et le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction est i divisé par r , et l'on trouvera ce rapport sensiblement égal à $4/3$; ainsi,

$$\frac{ib}{ar} = \frac{4}{3}$$

Un autre pinceau tombant dans la direction $l'c$, donnerait un autre pinceau réfracté $a'c$, les sinus d'incidence et de réfraction seraient alors i' et r' , et l'on aurait encore

$$\frac{i'}{r'} = \frac{4}{3}$$

Il en serait de même pour tous les pinceaux, quelle que soit leur incidence. Par conséquent, il est vrai de dire que le rapport des sinus d'incidence et de réfraction est constant pour les mêmes milieux. Ce résultat s'exprime en général de la manière suivante:

$$\frac{\sin. i}{\sin. r} = n.$$

r , est l'angle d'incidence ou celui du premier milieu.

a , l'angle de réfraction ou celui du second milieu.

n , l'indice de la réfraction.

Dans l'exemple précédent on aurait $n = 4/3$; mais si la surface de l'eau était en contact avec de l'hydrogène, ou avec de l'air raréfié, ou avec le vide, ou enfin avec un milieu différent de l'air ordinaire, l'indice toujours constant pour toutes les incidences aurait dans chaque cas une valeur plus ou moins différente de la valeur précédente. Si l'eau changeait de température, elle deviendrait réellement un autre milieu, et cette circonstance seule apporterait dans la valeur de l'indice un changement plus ou moins sensible.

L'appareil précédent est précisément celui qui fut employé autrefois par Descartes pour vérifier

par l'expérience les lois de la réfraction. Car la découverte de ces lois est due au génie de ce grand géomètre; il y avait été conduit *a priori* par des considérations théoriques que l'on regarde aujourd'hui comme de simples jeux d'imagination et qui ont cependant l'avantage d'avoir produit l'une des lois les plus belles et les plus fécondes de l'optique.

Nous indiquerons plus loin des moyens d'observation beaucoup plus précis et bien plus propres à démontrer l'exactitude mathématique de ces lois.

Quand la lumière repasse de l'eau dans l'air, l'angle d'incidence est alors celui qu'elle fait dans l'eau et l'angle de réfraction celui qu'elle fait dans l'air; mais tout en changeant de nom ces angles ne changent pas de valeur, le rayon qui tombe suivant ac se réfracte suivant ca , comme on peut le démontrer par l'expérience; c'est ce que l'on exprime d'une manière générale, en disant qu'un rayon qui *traverse un chemin repasse exactement par les mêmes lieux*. Ainsi n étant l'indice de réfraction quand la lumière passe d'un premier milieu dans

le second, $\frac{1}{n}$ est l'indice de réfraction quand elle repasse du second dans le premier.

Si la valeur de n est plus grande que l'unité, $\sin. r$ est plus grand que $\sin. s$, et r plus grand que s ; ce qui prouve que la lumière, en se réfractant, se rapproche de la normale; on dit alors que le second milieu est plus réfringent que le premier. (Fig. 587.)

Si n est égal à l'unité, $\sin. r$ est égal à $\sin. s$ et r égal à s ; c'est une preuve que la lumière ne se réfracte pas; on dit alors que le second milieu est aussi réfringent que le premier. (Fig. 588.)

Si n est plus petit que l'unité, $\sin. r$ est plus petit que $\sin. s$ et r plus petit que s ; c'est une preuve que la lumière en se réfractant s'éloigne de la normale; on dit alors que le second milieu est moins réfringent que le premier. (Fig. 589.)

Ces résultats s'énoncent ordinairement en disant que la lumière se rapproche ou s'éloigne de la normale, suivant que le second milieu est plus dense ou moins dense que le premier. Cette expression n'est pas rigoureusement exacte, parce qu'il arrive quelquefois qu'un milieu moins dense qu'un autre est cependant plus réfringent; et, en général, la réfringibilité est loin d'être proportionnelle à la densité.

La plus petite valeur de l'angle d'incidence est zéro; alors le rayon tombe suivant la normale, et comme le sinus d'un angle nul est lui-même égal à zéro, il est nécessaire, pour que la formule générale ne soit pas absurde, que l'on ait aussi $\sin. s = 0$, ou $s = 0$, ou, en d'autres termes, il est nécessaire que le rayon pénètre en ligne droite sans se dévier. C'est en effet ce que l'expérience confirme: jamais il n'y a de réfraction quand la lumière tombe suivant la normale au second milieu. (Fig. 590.)

La plus grande valeur de l'angle d'incidence est 90° , alors le rayon tombe parallèlement à la surface de séparation des deux milieux, (Fig. 591); et comme le sinus de 90° est égal à l'unité, on a

$$\frac{1}{\sin. s} = n, \text{ ou } \sin. s = \frac{1}{n}$$

La valeur de s que l'on en déduit est l'angle limite. Pour l'air et l'eau on a $n = 4/3$, et par conséquent $s = 48^\circ 35'$; jamais la lumière ne peut pénétrer de l'air dans l'eau sous une plus grande obliquité.

Aussi dans un vase plein d'eau $acdb$ (Fig. 592 bis), dont une portion bc' serait couverte, jamais un rayon de lumière directe ne pourrait pénétrer dans l'espace $ac'a$, l'angle $ac'e'$ étant de $48^\circ 35'$. Si l'œil y était placé et dirigé vers l'espace libre cc' , il n'apercevrait rien absolument, même quand cet espace serait éclairé par la plus vive lumière; seulement si l'eau n'était pas parfaitement limpide, il y aurait quelques rayons de lumière diffuse ou irrégulièrement réfléchi qui se répandraient dans l'espace $ac'e'$.

Réciproquement, quand la lumière, pour sortir de l'eau dans l'air, se présente sous un angle plus grand que l'angle limite, il est impossible qu'elle sorte, et il se produit alors un phénomène remarquable que l'on appelle le *phénomène de la réflexion totale*: les rayons qui ne peuvent sortir par l'excès de leur obliquité se réfléchissent en totalité suivant les lois ordinaires de la réflexion (Fig. 593), et c'est le seul cas où la lumière puisse se réfléchir complètement sans diminuer d'intensité.

Pour le verre ordinaire l'indice de réfraction peut varier depuis $3/2$ à 1,545, et par conséquent l'angle limite est compris entre $41^\circ 48'$ et $40^\circ 20'$. Il en résulte que si l'on avait un cylindre de verre (Fig. 593) terminé à l'une de ses extrémités par un plan perpendiculaire à l'axe et à l'autre par un plan incliné d'environ 40° et demi, on pourrait le tourner directement vers le soleil et placer impunément l'œil contre la face oblique, car on ne recevrait alors aucun rayon de lumière solaire. Le faisceau de lumière qui tombe sur a fait alors avec la normale un angle d'environ 40° et demi et éprouve par conséquent la réflexion totale.

Après avoir indiqué la réfraction de la lumière à son entrée dans les milieux indéfinis, nous allons étudier sa réfraction au travers des prismes de différentes substances.

DES PRISMES.

528. Définitions et phénomènes généraux que présentent les rayons qui traversent des prismes.

Un *prisme*, en optique, est un milieu diaphane ayant deux surfaces planes polies et inclinées entre elles. Concevons, pour plus de généralité, un morceau de verre, par exemple, sur lequel on ait taillé

un nombre quelconque de facettes planes, le verre compris entre deux de ces faces forme un prisme; quand la lumière pénètre par l'une et sort par l'autre on dit qu'elle traverse le prisme.

Le *sommet* du prisme est la ligne suivant laquelle se rencontrent les deux facettes ou suivant laquelle elles se rencontreraient si elles étaient suffisamment prolongées.

La *base* du prisme est une face quelconque opposée au sommet, soit qu'elle existe en réalité, soit que l'on suppose seulement son existence.

L'*angle réfringent* est l'angle formé par les deux faces du prisme.

Une *section principale* est une section faite par un plan perpendiculairement à l'arête qui forme le sommet.

Dans la plupart des expériences nous emploierons des prismes à trois faces rectangulaires AA' , AA' et AA' (Fig. 594). Alors quand la lumière traverse les faces AA' et AA' , c'est l'arête AA' qui est le sommet, et la face AA' qui est la base; quand elle traverse AA' et AA' , c'est AA' qui est le sommet, et AA' la base.

La section principale d'un tel prisme est toujours un triangle, et suivant que ce triangle est rectangle, isocèle, équilateral, on scélène, on dit que le prisme est lui-même *rectangle*, *isocèle*, *équilateral* ou *scélène*.

Ces prismes sont en général montés sur un pied en cuivre (Fig. 595). En tirant le tube T on peut les élever plus ou moins, et au moyen du *genou* G on peut leur donner toutes les positions qu'exigent les expériences. Quelquefois le *genou* est remplacé par deux mouvements de rotation (Fig. 596), l'un autour de l'axe N , l'autre autour de l'axe N' .

Voici maintenant les phénomènes les plus généraux que présentent les prismes, soit avec la lumière ordinaire, soit avec la lumière solaire.

Premièrement. Un prisme étant horizontal, le sommet en haut (1), si l'on approche l'œil près de l'une des faces pour recevoir la lumière qui est entrée par l'autre, on observe deux phénomènes remarquables : les objets sont considérablement *déviés* et comme relevés vers le sommet du prisme; de plus, ils sont colorés vers leurs bords de toutes les couleurs de l'iris, du moins vers leurs bords horizontaux, car les bords verticaux ne prennent point de couleurs nouvelles. Si le sommet du prisme était en bas, les phénomènes seraient inverses. En plaçant le prisme *verticalement*, les phénomènes se produisent alors *horizontalement* de droite à gauche ou de gauche à droite, suivant la position du sommet du prisme. En variant ainsi les observations on peut constater que la déviation a lieu toujours vers le sommet du prisme perpendiculairement aux arêtes, et la coloration toujours parallèlement aux arêtes; c'est-à-dire que les objets ne sont co-

lorés des nuances de l'iris que dans leurs bords qui se trouvent parallèles au prisme.

Ces phénomènes sont plus frappants et plus faciles à constater lorsqu'on regarde, par exemple, avec un prisme horizontal ou vertical les barreaux d'une croisée projetés sur le ciel, ou lorsqu'on regarde dans une chambre noire la flamme d'une bougie.

Secondement. Lorsqu'un trait de lumière solaire pénètre dans la chambre noire par une petite ouverture suivant la direction VO (Fig. 599), si l'on interpose près du vnet un prisme horizontal dont le sommet soit en haut, on observe du même une déviation et une coloration. Le trait est rabaisé vers la base du prisme dans la direction VB , et l'image du soleil, qui était en S circulaire et blanche, paraît en A allongée perpendiculairement aux arêtes du prisme et colorée des plus vives nuances de l'iris. Elle forme ce qu'on appelle le *spectre solaire*. Quand le sommet du prisme est en bas, la déviation se fait en haut avec les mêmes apparences; si le prisme est vertical ou incliné, elle se fait alors latéralement ou obliquement, et il est facile de vérifier par l'expérience qu'elle se fait toujours perpendiculairement aux arêtes du prisme.

Dans le chapitre suivant nous ferons l'analyse du spectre solaire, et, en général, de la coloration des faisceaux qui traversent les prismes; pour le moment nous allons nous occuper de leur déviation.

527. *Direction des rayons dans les prismes et conditions de leur émergence.* — Les angles d'incidence et de réfraction étant toujours dans le même plan (525), il est clair que tous les rayons qui tombent dans une section principale accomplissent leur trajet sans sortir de cette section. Par conséquent, pour suivre la marche de ces rayons il nous suffira de considérer l'angle au triangle qui forme la section du prisme.

Soit ABC (Fig. 597) la première face d'un prisme de verre, et $A'B'C'$ la seconde; ix , un rayon incident faisant avec la normale un angle i ; ix' et ix' le rayon réfracté et le rayon émergent qui en résultent. En passant de l'air dans le verre le rayon ix se brise et se rapproche de la normale; arrivé à la seconde face sous une certaine obliquité, il se brise de nouveau et repasse dans l'air en s'écartant de la normale; on conçoit que sa direction d'émergence ix' dépend de l'indice de réfraction de l'air par rapport au verre, de l'angle réfringent du prisme et de l'angle d'incidence sur la première face. Ces quatre quantités sont en effet liées entre elles par une formule remarquable; mais pour ne pas entrer ici dans une discussion mathématique trop compliquée, nous nous contenterons d'examiner les cas particuliers les plus importants.

Cherchons d'abord les conditions sous lesquelles l'émergence peut avoir lieu; car nous savons que la lumière qui est dans un milieu plus réfringent

(1) On peut supposer que la base est couverte avec une bande de papier ou de carton.

que l'air ne peut pas toujours en sortir pour repasser dans l'air (525), et qu'il y a pour son incidence un angle limite au delà duquel se produit une réflexion totale.

Soit i cet angle limite, qui est pour le verre ordinaire d'environ $40^{\circ} 30'$, et e l'angle réfringent du prisme; nous examinerons seulement les cas où l'on a

$$c \equiv 2L, c \equiv 1 \text{ et } c < L.$$

1°. Si l'angle réfringent du prisme est double de l'angle limite, aucun des rayons qui sont entrés par la première face ne peut sortir par la seconde; en effet, le rayon qui est entré parallèlement à AB (*Fig. 598*), se réfracte suivant $1'$ en faisant avec la normale un angle $1'18' = \tau$. Donc $1'$ est perpendiculaire à la ligne s qui divise l'angle réfringent du prisme en deux parties égales, car d'après l'hypothèse $n \sin \tau = 1$. Ainsi, en arrivant à la seconde face, le rayon $1'$ se présente sous l'angle limite et ne peut sortir, en du moins il est le dernier de ceux qui peuvent sortir. Tout autre rayon incident tel que 2 donnerait un rayon réfracté $2'$ qui serait plus oblique en arrivant à la seconde face et éprouverait nécessairement la réflexion totale.

On pourrait donc impunément fermer une chambre noire avec un prisme diaphane sans crainte qu'il entrât la moindre trace de lumière, pourvu que l'angle réfringent de ce prisme fût au moins double de l'angle limite qui convient à sa substance.

2°. Si l'angle réfringent est égal à l'angle limite, tous les rayons qui tombent entre la normale et la base du prisme peuvent sortir par la seconde face.

En effet, le rayon qui entre suivant la normale s_1 (Fig. 600), passe en droite ligne et arrive à la seconde face en faisant un angle $i_1' = i$, car cet angle est complément de i_1 's qui est lui-même complément de l'angle réfringent i_1 que nous avons supposé $= i$, donc ce rayon est le dernier de ceux qui peuvent sortir. Tous les rayons compris entre s_1 et s_1' tomberont sous une moindre obliquité et pourront émerger; au contraire, tous ceux qui tomberont dans l'angle $s_1 s_1'$ entreront sous une obliquité plus grande et éprouveront à la seconde face une réflexion totale.

3°. Quand l'angle réfringent est plus petit que l'angle limite, plusieurs des rayons qui tombent sur la première surface, entre la normale et le sommet, peuvent émerger à la seconde surface. Cela résulte évidemment de ce que nous venons de voir tout à l'heure; mais il est visible en même temps que jamais les rayons qui tombent suivant s_1 ne peuvent émerger, puisqu'ils font avec la seconde surface un angle plus grand qu'avec la première dans l'intérieur du prisme, et celui-ci est déjà l'angle limite.

Pour faciliter l'application de ces principes, nous donnons dans le tableau suivant les indices de réfraction et les angles limites de plusieurs substances.

Noms des substances.	Indices de réfract.	Angles Limites.
Chromate de plomb.	2,826	19° 56'
Diamant.	2,470	23° 43'
Soufre.	2,040	29 21
Zircon.	2,015	29 45
Grenat.	1,815	33 27
Spinelle.	1,812	33 30
Saphir.	1,768	34 26
Rubis.	1,779	34 12
Topaze.	1,610	38 24
Flint.	1,600	38 41
Crown.	1,533	40 43
Quartz.	1,548	40 15
Alun.	1,457	43 21
Eau (liquide).	1,336	48 28
Eau (glace).	1,310	49 46

Ainsi, pour chacune de ces substances, un prisme dont l'angle réfringent serait double des angles limites, ne laisserait passer aucune lumière. Par exemple, l'angle d'un triangle équilatéral étant de 60°, on voit que des prismes équilatéraux de chromate de plomb, de diamant et de soufre, ne laisseraient passer aucun des rayons qui se présentent pour traverser la seconde face après avoir traversé sa première. On voit encore que des prismes rectangulaires d'eau ou de glace laissent passer la lumière au travers de leurs deux faces perpendiculaires, ce qui n'arriverait pour aucune des substances du tableau précédent, depuis le chromate de plomb jusqu'à l'alun; car pour elles, 90° est plus que le double de leur angle limite.

Tous ces résultats peuvent être vérifiés par l'expérience, soit avec la lumière des corps, soit avec la lumière solaire.

528. De la déviation produite par les prismes, et particulièrement de la déviation minimum.— Quand la condition d'émergence est remplie, les rayons sortent en effet par la seconde face et sont plus ou moins déviés de leur direction primitive. L'angle de déviation ou la déviation est l'angle que l'image directe fait avec l'image réfractée, quand l'objet est supposé infiniment loin : ainsi ℓ étant le rayon incident, et ℓ' le rayon émergent (Fig. 501); si l'on place l'œil en e assez loin du prisme, on pourra recevoir en même temps un pinceau dans la direction $e\ell'$ et un pinceau dans la direction $e\ell$, parallèle à $\ell_1\ell$; le premier sera voir l'objet par réfraction, le second le fera voir directement, et l'angle $\ell'o\ell'$ = δ de ces deux images est la déviation.

Pendant qu'on regarde l'image réfractée d'un objet, si l'on fait tourner le prisme sur son axe, il est facile de voir que l'objet se déplace et par conséquent que la déviation change; mais on peut remarquer aussi qu'en partant d'une position extrême pour faire tourner le prisme dans le même sens, l'image se déplace d'abord, puis s'arrête, puis se déplace de nouveau pour retourner où elle était d'abord; lorsqu'elle s'arrête la déviation est *minimum*.

La même expérience se fait encore d'une manière plus frappante avec un trait de lumière solaire dans la chambre noire. Le spectre se déplace à mesure que l'on tourne le prisme, mais en portant pareillement d'une position extrême, pour tourner le prisme dans le même sens, on voit le spectre se rapprocher de plus en plus du lieu où se projetait l'image directe du soleil avant que le prisme fût interposé, puis elle s'arrête et s'en éloigne de nouveau à mesure que le prisme continue son mouvement. Le point où elle s'arrête correspond évidemment à une déviation minimum.

On démontre par le calcul, et l'on peut vérifier par l'expérience, que la déviation minimum a lieu quand les angles d'incidence et d'émergence sont égaux entre eux (Fig. 601), ou, ce qui revient au même, quand le rayon réfracté $11'$ fait un triangle isocèle $s11'$ avec les côtés du prisme, on a enfin quand l'angle de réfraction est $\frac{a}{2}$, a étant l'angle réfringent; car ce triangle étant isocèle, $\frac{a}{2}$ est complément de $s11'$ qui est lui-même complément de l'angle de réfraction correspondant. Cette position est remarquable et d'une grande utilité dans beaucoup d'expériences; il en résulte qu'en désignant par n l'angle de déviation minimum, par r l'angle d'incidence, et par a l'angle réfringent du prisme on a

$$n = 2r - a.$$

En effet, si l'on mène par le point o les lignes os et os' , respectivement parallèles à sa et $s'a'$, on a

$$n = 180 - s'oa - a - s'oa$$

et comme $s'oa = s'oa = 11a = 90 - r$

$$n = 180 - 180 + 2r - a$$

ou,

$$n = 2r - a$$

et par conséquent $r = \frac{n+a}{2}$.

Si l'on représente par n l'indice de réfraction de la substance on a en général

$$\frac{\sin. r}{\sin. s} = n$$

et puisque dans la position dont il s'agit on a

$$r = \frac{n+a}{2} \quad \text{et} \quad s = \frac{a}{2}$$

il en résulte

$$\frac{\sin. \left(\frac{n+a}{2} \right)}{\sin. \frac{a}{2}} = n$$

formule importante qui permet de trouver le rapport de réfraction n par la seule observation de la déviation minimum n , car il est toujours facile de déterminer l'angle réfringent a ; voici la disposition générale des expériences.

529. Recherche des indices de réfraction des solides et des liquides transparents.

1°. Pour les corps solides, on en fait d'abord un prisme dont on mesure l'angle réfringent a avec le goniomètre de Wollaston ou par d'autres moyens. Ce prisme étant disposé verticalement sur un alidade mobile en un lieu d'où l'on puisse apercevoir une mire très éloignée, en ajuste à quelques pas de distance un cercle répétiteur de manière que le limbe soit horizontal et à la hauteur du prisme et de la mire. L'une des lunettes est dirigée sur un point de la mire et ensuite fixée, avec l'autre on cherche à recevoir l'image réfractée du même point de la mire, ce qui sera toujours facile si le prisme est bien vertical. Dès que cette image vient tomber sous le fil de la lunette on fait tourner en même temps le prisme au moyen de l'alidade horizontale, et la lunette pour suivre l'image. Après quelques essais on trouve la position de la déviation minimum dont la mesure est donnée par l'angle des lunettes.

Cette valeur et la valeur connue de $\frac{a}{2}$ étant substituées dans la formule précédente, il n'y a plus d'inconnue que la valeur de n que l'on détermine aisément.

2°. Pour les liquides on suit exactement le même procédé; mais on leur donne la forme de prisme de la manière suivante: on perce un trou de part en part dans un prisme de verre (Fig. 604), et un trou plus petit v dans sa base. Le premier se ferme en appliquant sur chaque face du prisme une petite plaque de verre à faces bien parallèles, ensuite on le remplit de liquide et l'on met en v un bouchon a à l'émeri. On a coutume de faire sur la longueur d'un prisme solide cinq ou six prismes liquides (Fig. 605).

3°. Nous exposerons plus tard (microscope) un troisième procédé imaginé par M. Brewster pour déterminer les indices de réfraction des liquides et ceux des corps mous, comme la cire, le caoutchouc, etc., etc., qui deviennent suffisamment transparents lorsqu'ils sont réduits en lames très minces. Ce procédé simple et très ingénieux offre surtout les avantages suivants: 1° il s'applique à une petite goutte de liquide ou à une parcelle de corps solide; 2° il réduit toutes les mesures à la détermination de trois distances rectilignes très faciles à estimer avec exactitude.

Le tableau suivant contient les résultats des principales expériences qui ont été faites sur les solides, les liquides et les corps mous pour déterminer leurs indices de réfraction. Il est extrait de l'Encyclopédie de M. Brewster, et les nombres qui ne portent pas de nom ont été déterminés par cet habile observateur; M. Brewster fait remarquer toutefois que pour plusieurs substances il n'a eu à sa disposition que des échantillons très imparfaits.

Tableau des indices de réfraction.

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES de réfraction.	NOMS des observateurs.	NOMS DES SUBSTANCES	INDICES de réfraction.	NOMS des observateurs.
Chromate de plomb, maximum.	2,974		Sulfate de baryte, <i>ref. extraord.</i>	1,6352	Malus.
id. id. autre espèce.	2,976		id. id. <i>ref. ordinaire.</i>	1,6281	Biot.
Argent rouge	2,564		Topase incolore	1,6102	id.
Rélgar artificiel	2,549		id. du Brésil, <i>ref. extraord.</i>	1,6401	id.
Chromate de plomb, minimum.	2,528		id. id. <i>ref. ordinaire.</i>	1,6325	id.
Anatase	2,500		Antydrite, <i>ref. extraordinaire.</i>	1,6219	id.
Diamant	2,555		id. <i>ref. ordinaire.</i>	1,5772	id.
id.	2,487	Rochon.	Euclase, <i>extraordinaire.</i>	1,683	id.
id.	2,478		id. <i>ordinaire.</i>	1,6429	id.
id.	2,439		Perle	1,853	
Sulfure de zinc	2,260		Verre rouge, hyacinthe	1,617	
Phosphore	2,224		Huile de cassia	1,641	
Verre d'antimoine	2,216		Verre apale	1,835	
id. id.	1,980	Wollaston.	Baume de tolu	1,628	
Soufre fondu	2,148		Castor ?	1,628	
id. natif	2,115		Hydrochlorate d'ammoniaque	1,625	
id. id.	2,048	Wollaston.	Gayac	1,612	
id. id.	1,958	Haüy.	Flint-glass	1,616	
Oxide lamellaire de fer	2,100	Yung.	id. autre espèce	1,604	
Verre, 3 de plomb et 1 de flint.	2,028	Zeher.	Mésonite	1,808	
Tungstate de chaux, maximum.	2,129		Flint glass	1,80512	Malus.
id. id. minimum.	1,970		id.	1,576	
Carbonate de plomb, maximum.	2,084		Autre espèce	1,598	
id. id. minimum.	1,813			1,825	
Protochlorure de mercure	1,978			1,604	
Zircon, maximum	2,015		Flint-glass, différentes espèces.	1,594	Boscovich.
id. id. minimum.	1,581			1,593	
id.	1,958	Wollaston.		1,590	
Verre, 2 de plomb, 1 de sable.	1,987	id.	Huile d'amandes amères	1,603	
Sulfate de plomb	1,925		Verre vert	1,615	
Verre d'antimoine	1,869	Newton.	id. pourpre	1,688	
Verre, 2 de plomb, 1 de flint.	1,830	Zeher.	Huile d'avis	1,801	
Grenat	1,815		Baume du Péron	1,597	
Spinel rouge	1,812	Wollaston.	Gomme ammoniaque	1,592	
Arenie	1,811	id.	Écaille de tortue	1,591	
Saphir bleu	1,794		Frix	1,586	
id. blanc	1,788	Wollaston.	Baume styrax	1,584	
Piropse	1,792		Verre de bouteilles	1,582	
Nitrate d'argent, maximum.	1,788		Acide tartarique	1,575	
id. id. minimum.	1,729		id. id.	1,518	
Verre, 1 de plomb, 1 de flint.	1,787	Zeher.	Verre rose	1,578	
Rubis	1,779		Corne	1,565	
Feldspath	1,764		Quartz, <i>ref. extraordinaire.</i>	1,558	Malus.
Chrysobéril	1,760		id. <i>ref. ordinaire.</i>	1,548	id.
Nitrate de plomb	1,758		Mellite	1,558	
Verre, 3 de plomb, 4 de flint.	1,752		id.	1,538	
id. 1 de plomb, 2 de flint.	1,724		Gomme mastic	1,560	
Axinite	1,735		Pois de Bourgogne	1,560	
Verre coloré en rouge foncé	1,729		Résine	1,559	
Verre coloré en rouge par l'ir.	1,715		Térébenthine	1,557	
Épidote, maximum	1,723		Sel gemme	1,557	
id. minimum	1,881		Sucre fondu	1,554	
Carbonate de strontiane, max.	1,720		Encens	1,554	
id. id. min.	1,543		Comptonite	1,553	
Boracite	1,721		Calcédoine	1,553	
Verre coloré en orange	1,695		Sulfate de cuivre, maximum.	1,552	
Sulfure de carbone	1,678		id. id. minimum.	1,531	
Chrysolite, maximum	1,685		Copal	1,549	
id. minimum	1,882		Baume du Canada	1,549	
Aragonite, <i>ref. ordinaire.</i>	1,6931	Malus.	Résine élém.	1,547	
id. <i>ref. extraordinaire.</i>	1,5348	id.	Huile de tabac	1,547	
Spath calcaire, <i>ref. ordinaire.</i>	1,6543	id.	Verre en feuille	1,542	Boscovich.
id. id. <i>ref. extraord.</i>	1,4833	id.	id. id.	1,538	id.
Sulfate de baryte	1,6468	id.	id. id.	1,529	id.

NOMS DES SUBSTANCES.	DEGRES de réfraction.	NOMS des observateurs.	NOMS DES SUBSTANCES.	DEGRES de réfraction.	NOMS des observateurs.
Verre en feuille.	1,526	Boscovich.	Sulfate de magnésie	1,485	
id. id.	1,514	id.	Huile d'hyssop.	1,487	
Vieux verre en feuille.	1,515		Camphre.	1,467	
Dichroïte	1,544		Huile de fenugrec.	1,467	
Glace de Saint-Gobio.	1,543	Wollaston.	id. de Cajeput.	1,483	
Colophane.	1,543	id.	id. d'amandes.	1,483	
Cire.	1,548	id.	id. de sabine.	1,488	
Gomme olibas.	1,544		id. de pouillot.	1,483	
Acide phosphorique solide	1,544		Sulfate d'ammoniaque et de magn.	1,483	
Carbonate de baryte, minimum.	1,540		Carbonate de potasse.	1,463	
Crown-glass.	1,534		Huile de limon.	1,479 ?	
Caoutchouc.	1,534		id. de menthe sauvage.	1,481	
id.	1,504	Wollaston.	Beurre froid.	1,480	Wollaston.
Crown glass.	1,533	id.	Opale en partie hydrophane.	1,479	
Verre de borax.	1,538		Huile de thym.	1,477	
Verre de phosphore	1,538		id. d'aneth.	1,477	
Huile de sassafras.	1,538		Essence de limon.	1,476	Wollaston.
id. id.	1,536	Wollaston.	Huile de térébenthine.	1,475	
id. id.	1,544	Euler.	id. commune.	1,476	Wollaston.
Huile de girofle.	1,535	Wollaston.	id. rectifiée.	1,470	id.
Cristallo de poisson, au centre.	1,530	id.	id. de raves.	1,475	
Cristallo de bœuf desséché.	1,530	id.	Borax.	1,475	
Verre ?	1,500		Huile de genièvre.	1,473	
Baume de copahu.	1,526		Huile de hêtre.	1,471	
Leucite.	1,527		Huile de bergamotte.	1,471	
Verre en feuille.	1,527		Huile d'olive	1,470	
Acide citrique.	1,527		Spermaceti.	1,470	
Laque en écaille	1,525		Huile de romarin.	1,469	
Crown-glass.	1,525	Wollaston.	id. d'olive	1,467	Newton.
Sulfate de chaux	1,525		id. id.	1,469	Wollaston.
Verre de borax, 1 de borax et 2 de silice.	1,522		id. de lavande	1,467	id.
Gomme adragante.	1,520		Soif fondo	1,464	
Mésotype, maximum.	1,528		Huile de parots.	1,463	
id. minimum.	1,516		id. de lavande	1,457	
Nitre, maximum.	1,514		Alun.	1,457	Wollaston.
id. minimum.	1,335		Huile de camomille.	1,457	
id.	1,504	Newton.	id. d'absathe	1,453	
Tartrate de potasse et de soude.	1,515		Cristallin de bœuf.	1,563	Euler.
Verre en feuille d'Hollande.	1,517		id. id.	1,447	Wollaston.
Sulfate de xiao, ref. ordinaire.	1,517		Spermaceti fondo.	1,448	id.
Madelstein.	1,515		Acide hydrophosphorique.	1,448	
Cire, 17,5 cent.	1,512	Malos.	id. sulfurique	1,440	
id. foodote.	1,450	id.	id. id.	1,435	Wollaston.
id. au point d'ébullition.	1,448	id.	Acide sulfurique	1,428	Newton.
Gomme arabique	1,512		Spath fluor.	1,426	
Sulfate de potasse.	1,509		id. id.	1,423	Wollaston.
id. id.	1,425		Huile de rhue.	1,423	
Huile de camie	1,508	Wollaston.	Acide phosphorique liquide.	1,426	
Stilbine.	1,508		id. nitrique, densité 1,410.	1,410	Wollaston.
Huile de noix.	1,507		id. hydrochlorique très concentré.	1,410	Biot.
id. de piment	1,507		id. id. concentré.	1,401	
id. de fenouil	1,506		id. nitrique.	1,406	
id. d'ambre.	1,505	Wollaston.	id. nitreux.	1,396	
id. de bois de Rhodes.	1,500		id. acétique.	1,396	
id. de saïze.	1,500		id. mahique.	1,395	
id. de muscade.	1,497	Wollaston.	Alcool	1,374	
Baume de soufre	1,497		id.	1,370	Wollaston.
Sulfate de fer, maximum.	1,494		Huile d'ambre gris.	1,368	
Huile d'angelique.	1,493		Blanc d'œufs	1,361	
id. de merjolaine.	1,491		id. id.	1,351	Euler.
id. de carvi.	1,491		Albumine	1,360	Wollaston.
id. de ricin.	1,490		Éther.	1,358	id.
Obsidienne.	1,488		Colle de poisson.	1,345	
Suif froid	1,490	Wollaston.	Cryolite.	1,349	
Sulfate de magnésie	1,488		Vinaigre distillé	1,344	Euler.

NOMS DES SUBSTANCES.	rapport de réfraction.	nom des observateurs.
Eau salée.	1,343	Wollaston.
Humeur aqueuse de l'œil. . .	1,357	
Humeur vitrée.	1,359	
Enveloppe extérieure du cristall.	1,377	
Enveloppe moyenne	1,379	Bradley.
id. centrale.	1,399	
Cristallin entier.	1,386	
Eau.	1,336	
Glace.	1,310	Bradley.
id.	1,307	
Tabasbir.	1,111	
Air	1,000276	
Vide.	1,000000	

la première et de la seconde substance par rapport au vide, on a :

$$\frac{\sin. r}{\sin. s} = n \text{ et } \frac{\sin. r'}{\sin. s'} = n'$$

r est l'angle LiN ,
 s ... l'angle $n'N' = iN'P$,
 r' ... l'angle $n'Q = i'N'P'$,
 s' ... l'angle $n'Q'$.

Et puisque $r = s'$, on en déduit :

$$\frac{\sin. r'}{n'} = \frac{\sin. r}{n} \text{ ou } \frac{\sin. r' n'}{\sin. r n} = \frac{n}{n'}$$

Donc, en passant du premier milieu dans le second, la lumière fait des angles tels que le rapport de leurs sinus est constant et égal au rapport des indices de ces milieux, relativement au vide.

Il en résulte évidemment, qu'un rayon de lumière qui traverse un nombre quelconque de milieux à faces parallèles, se trouve réfracté par le dernier de ces milieux, comme il l'aurait été s'il y fût entré immédiatement sous la même incidence. Ainsi, dans la fig. 807, si un rayon tombait immédiatement sur le second milieu, en n , parallèlement à Li , il se réfracterait suivant $n'P'$ et émergerait comme il fait suivant r' .

Nous démontrerons plus tard que la vitesse de propagation de la lumière est différente dans les différents milieux, et que le rapport de ces vitesses dans deux milieux quelconques, est précisément le rapport inverse des indices de réfraction de ces milieux; par conséquent, la plus grande vitesse a lieu dans le vide, et la moindre dans le chromate de plomb, qui est le milieu le plus réfringent. Celle-ci est à peu près un tiers de la première, puisque l'indice du chromate de plomb est presque égal à 3. En rapprochant ce résultat du précédent, on voit que, dans le même milieu, la lumière a toujours la même vitesse, quelle que soit la route qu'elle suive pour y arriver et les réfractions qu'elle éprouve dans son trajet. Ainsi, par exemple, c'est toujours avec la même vitesse qu'elle traverse les humeurs de l'œil et qu'elle vient frapper la rétine, soit qu'elle y pénétre en sortant de l'eau, de l'huile, du vide, de l'air ou de tout autre milieu; aussi ce qui nous paraît rouge ou bleu dans l'air, nous paraît rouge ou bleu dans l'eau. Mais si l'humeur de l'œil était un peu altérée dans sa nature, de manière que son indice de réfraction fût changé, à l'instant la vitesse de la lumière changerait en sens contraire, et il est bien probable, comme nous le verrons, que toutes les couleurs changeraient alors de nuance et de ton.

531. *Recherche du rapport de réfraction des corps opaques.* — Le phénomène de la réflexion totale dont nous avons parlé (525) a conduit Wollaston à un procédé ingénieux pour déterminer l'indice de réfraction de certains corps opaques, et par suite leur puissance réfractive et leur pouvoir réfringent.

Coupons un prisme rectangulaire diaphane

530. *Du changement de couleur de l'indice de réfraction d'une substance quand le milieu qui l'environne change de nature, et de la vitesse de la lumière dans les différents milieux.*

Dans le tableau précédent, les indices de réfraction sont déterminés en supposant que la lumière passe immédiatement du vide dans chacune des substances; mais si la lumière passait, par exemple, de l'eau dans le verre, il est évident que l'indice de réfraction du verre par rapport à l'eau ne pourrait pas être le même que l'indice de réfraction du verre par rapport au vide, bien qu'il soit constant dans un cas comme dans l'autre. Les recherches sur ce sujet ont conduit à un résultat général qui peut être énoncé de la manière suivante : n et n' étant les indices de réfraction de deux substances par rapport au vide, l'indice de la seconde, par rapport à la première, est —. Ainsi, l'indice de l'eau

par rapport au vide étant 1,336, et celui du verre ordinaire étant 1,525, l'indice du verre par rapport à l'eau est 1,525 divisé par 1,336 ou 1,141; celui de l'eau par rapport au verre serait 1,336 divisé par 1,525 ou 0,876.

On peut démontrer cette vérité fondamentale par des expériences semblables à celles qui servent à déterminer, en général, les indices de réfraction; pour cela, il suffit d'accoler deux prismes de diverses substances, soit en opposant leurs angles, soit en les tournant dans le même sens (Fig. 602), et d'observer la déviation que ce système imprime à la lumière. Les angles d'incidence et d'émergence étant connus, ainsi que les angles réfringents des prismes et leurs indices de réfraction par rapport au vide, il sera facile de trouver par le calcul les angles i et i' du rayon avec la surface commune, et de vérifier si leurs sinus sont entre eux comme les indices n et n' . On peut aussi employer deux lames parallèles superposées (Fig. 807); alors on reconnaît par l'expérience que le rayon incident Li , et le rayon émergent $r'N$, sont toujours parallèles. Or, n et n' , étant les indices de réfraction de

ANO (Fig. 603), dont l'une des faces AB soit horizontale, et imaginons qu'une goutte de liquide G soit immédiatement appliquée contre cette face, n est l'indice de réfraction du prisme et n' celui du liquide, vv' est une règle verticale sur laquelle on fait glisser un rayon on une plaque percée d'un petit trou pour regarder dans la direction oz et dans d'autres directions plus ou moins obliques. Si le prisme est de crown-glass, dont l'indice soit de 1,535, l'angle limite sera $40^{\circ}39'$, et par conséquent le rayon qui aurait pénétré parallèlement à AO , viendrait tomber sur AO , en faisant un angle de $90^{\circ}-40^{\circ}39' = 49^{\circ}21'$, et ne pourrait sortir. Ainsi, en regardant par la face NO , on ne verrait aucun des objets qui sont au delà de la face AO ; seulement par réflexion totale sur cette face, on pourra distinguer les objets qui sont au devant de AO . C'est en effet ce que l'expérience confirme, sur tous les points de AO qui ne sont pas recouverts de liquide, mais là où le liquide touche le verre il se produit un autre phénomène. La lumière qui vient dans diverses directions, telle que LI , passe dans la goutte, sans éprouver de réflexion totale, et l'œil, placé dans la direction $o'a'$, aperçoit en o une tache noire comme si le miroir AB était percé d'un trou. Cependant à mesure que l'œil s'abaisse vers o , pour regarder par des rayons plus obliques, la goutte paraît moins noire, et enfin, si le liquide est moins réfringent que le prisme, il arrive qu'à une certaine obliquité telle que oe , par exemple, la goutte disparaît subitement, et la face AO fait partout l'effet d'un miroir parfait. C'est en mesurant cette obliquité de disparition, ou l'angle zov , que l'on peut déterminer l'indice n' du liquide qui mouille le prisme en o ; en effet, cet angle étant connu, on en déduit son complément $oev = r$. En substituant sa valeur et celle de n dans la relation,

$$\frac{\sin. r}{\sin. n} = n.$$

On en déduit l'angle $s = r \pm 1$, et par suite son complément $z1q = q11$. Or, puisque c'est sous cette obliquité que la goutte commence à disparaître, il est clair que le rayon LI est le rayon limite, c'est-à-dire celui qui, en passant dans le liquide, donne un rayon émergent parallèle à AO ; on a donc :

$$\frac{\sin. 90^{\circ}}{\sin. LIq} = \frac{n}{n'} \quad \text{d'où } n' = n \sin. LIq.$$

On peut donner une autre forme à cette valeur inconnue de n' en l'exprimant directement au moyen de l'angle observé NOV , que nous désignerons par s . On aurait alors :

$$n' = n \cos s.$$

Cette formule est celle qui convient aux corps diaphanes que l'on met en contact avec le prisme.

Mais quand ces corps sont opaques, on se sert de cette autre formule,

$$n' = n - 2 \cos s.$$

Les raisonnements que nous avons faits pour démontrer la première ne s'appliquent nullement à la seconde, et s'il est nécessaire d'adopter pour les corps opaques comme la théorie de l'émission l'indique, il est nécessaire aussi de trouver dans la théorie des ondulations des raisonnements qui la justifient; car ceux que je pourrais donner ici me semblent insuffisants.

532. *De la puissance réfractive et du pouvoir réfringent.* — On est convenu d'appeler *puissance réfractive* d'une substance, le carré de son indice de réfraction diminué de l'unité, ou $n^2 - 1$. Cette définition n'est pas purement arbitraire comme elle le paraît d'abord; la quantité $n^2 - 1$ a reçu un nom particulier, parce qu'elle a une liaison simple et remarquable avec la cause de la réfraction dans le système de l'émission; elle est l'accroissement du carré de la vitesse qui prend la lumière en passant du vide dans les diverses substances; car, dans ce système, on est inévitablement conduit à supposer que la lumière augmente de vitesse en passant dans les milieux plus réfringents. Dans le système des ondulations, cette même quantité dépend des divers degrés de condensation de l'éther.

La puissance réfractive peut être évaluée d'une manière absolue ou d'une manière relative, par exemple, 1,326 et 0,785 sont les puissances réfractives absolues du verre et de l'eau, ou les valeurs de $n^2 - 1$ correspondantes à ces substances; mais en divisant le premier de ces nombres par le second, l'on aurait 1,600 qui serait la puissance réfractive du verre par rapport à celle de l'eau.

Le *pouvoir réfringent* d'une substance est le quotient de sa puissance réfractive par sa densité. Ainsi le pouvoir réfringent du verre ordinaire est 0,533, et celui de l'eau 0,785. Et si l'on voulait évaluer le premier par rapport au second, c'est-à-dire, en prenant le second pour unité, il faudrait diviser 0,533 par 0,785, ce qui donnerait 0,679 pour le pouvoir réfringent du verre rapporté à l'eau. Nous avons tiré de l'Encyclopédie de Brewster les résultats suivants :

Tableau des pouvoirs réfringents de quelques corps solides et liquides.

Nature de substance.	Pouvoirs réfringents absolus
Tobasbir.	0,098
Cryolite.	0,274
Spath-fluor.	0,343
Sulfate de baryte.	0,383
Quartz.	0,541 Malus.
Acide sulfurique.	0,612 Newton.
Spath calcaire.	0,642 Malus.
Cristal de roche.	0,654

Acide nitrique.	0,668
Flint-glass, minimum. . . .	0,734
Rubis.	0,739
Topaze du Brésil.	0,749
Eau.	0,785
Flint-glass, maximum. . . .	0,874
Alcool.	1,012
Carbonate de potasse.	1,023
Chromate de plomb.	1,044
Hydro-chlorate d'ammoniaque. .	1,129
Nitrate de potasse.	1,196
Hydro-chlorate de soude . . .	1,209
Camphre.	1,255 Newton.
Huile d'olive.	1,261 Newton.
Huile de lin.	1,282 Newton.
Cire.	1,331 Malus.
Essence de thérbenthine. . . .	1,322 Newton.
Ambre.	1,365 Newton.
Octaèdrite.	1,382
Diamant.	1,396 Malus.
Diamant.	1,456 Newton.
Asphalte.	1,667
Ambre gris.	1,709
Soufre.	2,200
Phosphore.	2,886

Newton, qui ne connaissait ni le pouvoir réfringent du soufre ni celui du phosphore, avait remarqué que les substances combustibles, comme les huiles et les résines, avaient en général des pouvoirs réfringens considérables, et il n'avait pas hésité à conclure que l'eau et le diamant devaient aussi, à cause de leur grande réfringence, renfermer un principe combustible; cette conjecture hardie a été depuis pleinement vérifiée par l'expérience, car nous savons maintenant que le diamant n'est que du charbon, et nous verrons (533) que l'hydrogène est en même temps le plus réfringent et le plus combustible des corps; de plus, le soufre et le phosphore viennent encore généraliser cette remarque.

Quand une substance se dilate ou se condense soit par une action mécanique, soit par la chaleur, son indice de réfraction change ainsi que sa densité; mais il paraît que son pouvoir réfringent reste sensiblement constant; sous la seule condition que cette substance ne passe pas à l'état gazeux, car nous verrons bientôt que dans ce cas le pouvoir réfringent éprouve une diminution sensible.

533. *Recherche de l'indice de réfraction des gaz, de leur puissance réfractrice et de leur pouvoir réfringent.* — Pour déterminer l'indice de réfraction de l'air on pourrait faire passer la lumière du vide dans un prisme d'air d'un angle connu; mais l'expérience inverse offre plus de facilités: on fait passer le rayon au travers d'un prisme vide environné d'air; et l'indice de réfraction se détermine encore comme dans les solides et liquides, c'est-à-dire, par la connaissance de l'angle réfringent du

prisme, de l'incidence de la lumière sur sa première face, de l'émergence à la seconde et de la déviation, en ajoutant à ces données la température et la pression de l'air environnant. L'indice de réfraction de l'air une fois trouvé, on arrive par des expériences analogues à l'indice des différents gaz pour des températures et des pressions connues. Cette question délicate et importante a été traitée par MM. Arago et Biot en 1805, et par M. Dulong en 1825. Nous essayerons seulement de donner ici une analyse des procédés qui ont été employés par ces habiles physiciens, et des résultats auxquels ils sont parvenus.

MM. Arago et Biot employaient un *prisme à gaz* qui est représenté vu par en haut dans la fig. 609 et vu du face dans la fig. 610. Il se compose d'un tube de verre rr' de 20 à 30 centimètres de longueur sur 4 à 5 centimètres de diamètre, dont les deux extrémités sont d'abord coupées en biseau, suivant les directions rr' et $r's'$, et ensuite recouvertes et fermées hermétiquement par des lames de verre à faces parallèles. L'angle que ces lames forment entre elles est l'angle du prisme, il doit être très grand à cause de la faible réfringence du gaz; dans l'appareil de MM. Arago et Biot, il était de $143^{\circ} 7' 29''$. Au milieu de la longueur du tube, et parallèlement aux faces du prisme, on pratique deux ouvertures opposées v et v' (Fig. 610), pour introduire ou enlever à volonté au moyen d'une machine pneumatique le gaz que l'on veut soumettre à l'expérience. Les petits tubes qui sont scellés dans ces ouvertures sont munis de robinets convenables, et communiquent à un baromètre qui donne à chaque instant la pression du gaz intérieur.

Supposons que le prisme soit vide, que son arête soit verticale, et qu'il ait été disposé pour l'expérience en un lieu d'où l'on puisse apercevoir une mire très éloignée, (Fig. 608); l'observateur, placé en e , verra une image directe ca de cette mire, et une image réfractée ca' ; l'angle Lox sera la déviation; cet angle devra être observé avec une grande exactitude, car il s'élèvera seulement à 5 ou 6 minutes; avec cette donnée et l'angle réfringent du prisme on pourra trouver l'indice de réfraction par la formule précédente (528 et 529), si l'on a choisi la position du minimum. Seulement il faudra faire les corrections nécessaires, soit à cause de l'air qui reste dans le prisme, soit à cause du défaut de parallélisme des lames qui en forment les faces.

Par des expériences précises et souvent répétées, MM. Arago et Biot ont établi, qu'à la température de 0, et sous la pression de 0^m,76, l'indice de réfraction de l'air, par rapport au vide absolu, est de 1,000294, et sa puissance réfractive est par conséquent 0,000588. Ce résultat se trouve parfaitement conforme à celui que Delambre avait déduit des réfractions astronomiques.

L'indice de réfraction de l'air une fois connu,

on fait passer dans le prisme les gaz que l'on veut soumettre à l'expérience, et après avoir observé la déviation qu'ils produisent, il reste à faire les calculs convenables pour en déduire soit les indices de réfraction, soit les puissances réfractives. MM. Arago et Biot ont soumis à l'expérience, l'air, l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, l'ammoniaque, l'acide carbonique et l'acide hydrochlorique; et ils ont établi ce principe fondamental : que les puissances réfractives d'un gaz sont proportionnelles à sa densité, ou, ce qui revient au même, que le pouvoir réfringent d'un gaz est constant à toute température et à toute pression. Ce principe est encore vrai, quand les gaz se mélangent d'une manière quelconque, c'est-à-dire que la puissance réfractive d'un mélange est égale à la somme des puissances réfractives de ses éléments. Mais nous allons voir, d'après les recherches de M. Dulong, que toutes les fois que les gaz se combinent, la puissance réfractive du produit cesse d'être égale à la somme des puissances réfractives des composans.

M. Dulong s'est principalement proposé de comparer entre elles les puissances réfractives des gaz à la même température et sous la même pression, et l'artifice ingénieux qu'il a employé pour y parvenir lui a permis de donner à ses résultats un degré d'exactitude véritablement inespéré dans des recherches aussi délicates. Cet artifice consista à donner aux différens gaz une densité telle qu'ils imprimèrent tous exactement la même déviation à la lumière; pour cela on prisme analogue au précédent, ayant un angle de 145° environ, communiqua à un réservoir dans lequel on peut, d'une part, faire le vide au moyen de la machine pneumatique, et de l'autre introduire un gaz quelconque en variant à volonté les pressions. L'on fait, par exemple, une première expérience en introduisant dans le prisme de l'air sec sous la pression ordinaire et à une température connue; avec une bonne lunette placée à quelque distance, on regarde l'image d'une mire éloignée réfractée au travers du prisme; cela fait, on fixe la lunette dans cette position, on vide le prisme bien complètement, sans le déranger, et l'on y introduit un autre gaz, de l'acide carbonique, par exemple, en variant la pression jusqu'à l'instant où l'image réfractée de la mire vient tomber de nouveau sous le fil de la lunette; la température étant restée la même, supposons que la pression de l'acide carbonique dans le prisme soit alors de 0,498. Sous cette pression, l'acide carbonique dévient la lumière autant que l'air à 0,76, il est évident qu'il a le même indice de réfraction et la même puissance réfractive, et puisque les puissances réfractives sont proportionnelles aux densités, on aura :

$$1 : x :: 0,498 : 0,76;$$

d'où $x = 1,526$, qui sera la puissance réfractive de l'acide carbonique sous la pression de 0,76 et à la même température que l'air.

Par des expériences analogues sur tous les gaz simples ou composés on obtiendra, comme on le voit, leurs puissances réfractives relativement à l'air au moyen d'une simple proportion.

Les résultats de M. Dulong sont contenus dans le tableau suivant :

Puissances réfractives des gaz rapportées à celle de l'air à force élastique égale.

Noms des gaz.	Puissances réfractives.	Densités.
Air atmosphérique.	1, ...	1
Oxygène.	0,924.	1,1026
Hydrogène.	0,470.	0,0685
Azote.	1,020.	0,976
Chlore.	2,623.	2,47
Oxide d'azote.	1,710.	1,527
Gas nitreux.	1,03	1,039
Acide hydro-chlorique.	1,537.	1,254
Oxide de carbone.	1,157.	0,972
Acide carbonique.	1,526.	1,524
Cyanogène.	2,532.	18,18
Gas oléfiant.	2,302.	0,980
Gas des marais.	1,504.	0,559
Éther muriatique.	3,78	2,234
Acide hydro-cyanique.	1,531.	0,944
Ammoniaque.	1,309.	0,591
Gas oxo-chloro-carbonique.	3,938.	3,442
Hydrogène sulfuré.	2,187.	1,178
Acide sulfureux.	2,380.	2,247
Éther sulfurique.	5,187.	2,580
Soufre carburé.	5,110.	2,644
Hydrogène phosph. minim.	2,682.	1,256

Pour passer maintenant des puissances réfractives relatives aux puissances réfractives absolues, il faut avoir recours à la donnée fondamentale qui nous a été fournie précédemment, sur la puissance réfractive absolue de l'air, par les expériences de MM. Arago et Biot, et par les observations astronomiques de Delambre. Cette puissance réfractive étant 0,000589, il est clair qu'il faut multiplier par ce nombre tous les nombres de la première colonne du tableau précédent pour avoir les puissances réfractives absolues correspondantes ou les valeurs de $x = 1$. Ensuite, si l'on veut en déduire aussi les indices de réfraction, il suffira d'ajouter l'unité et d'extraire la racine carrée de la somme. C'est ainsi que l'on arrive au tableau suivant.

Tableau des puissances réfractives des gaz à 0° et 0°,76.

Noms des gaz.	Indices de réfraction.	Puissances réfractives.	Densités.
Air atmosphérique.	1,000294	0,000589	1
Oxygène	1,000272	0,000544	1,103
Hydrogène.	1,000138	0,000277	0,068
Azote	1,000300	0,000601	0,976
Ammoniaque.	1,000385	0,000771	0,591
Acide carbonique.	1,000449	0,000899	1,524
Chlore.	1,000772	0,001515	2,470

Noms des gaz.	Indices de réfraction.	Puissances réfractives.	Densité.
Acide hydrochlorique..	1,000449	0,000899	1,254
Oxide d'azote	1,000503	0,001007	1,027
Gaz nitreux.	1,000303	0,000606	1,039
Oxide de carbone. . .	1,000340	0,000681	1,092
Cyanogène.	1,000834	0,001868	1,818
Gaz oléfiant	1,000678	0,001350	0,980
Gaz des marais. . . .	1,000443	0,000886	0,559
Éther muriatique . . .	1,001095	0,002191	2,234
Acide hydrocyanique .	1,000451	0,000903	0,944
Gaz oxo-chloro-carb..	1,001159	0,002318	3,442
Acide sulfureux	1,000865	0,001831	2,247
Hydrogène sulfuré . .	1,000644	0,001288	1,178
Éther sulfurique. . . .	1,001153	0,002301	2,580
Soufre carburé.	1,001150	0,002301	2,644
Hydrogène protoxyphorique.	1,000789	0,001579	1,256

En comparant sous divers points de vue les nombres contenus dans les tableaux précédents, on en peut tirer les quatre conséquences suivantes.

1°. On ne découvre aucun rapport entre les nombres qui représentent les puissances réfractives des gaz et ceux qui représentent leurs densités; car ces nombres croissent, tantôt dans un même ordre, tantôt dans un ordre inverse.

2°. La puissance réfractive d'un mélange est égale à la somme des puissances réfractives de ses éléments. Par exemple, l'air étant composé de 0,21 d'oxygène et 0,79 d'azote, on trouve que la somme des puissances réfractives des éléments est 0,99084, qui diffère très peu de l'unité. M. Dulong n'a fait aussi des expériences directes sur plusieurs mélanges artificiels, pour vérifier ce résultat qui servait de principe à ses recherches.

3°. La puissance réfractive d'un composé gazeux est tantôt plus petite, tantôt plus grande que la somme des puissances réfractives des composants. C'est en effet ce qui résulte du tableau suivant, dans lequel la première colonne représente les puissances réfractives observées, et la seconde les puissances réfractives calculées d'après les éléments constitutifs en tenant compte des condensations qu'ils éprouvent.

Puissances réfractives des fluides élastiques composés.

La puissance réfractive de l'air = 1.

Noms des gaz.	Puiss. réfract. observées.	Puiss. réfract. calculées.	Écarts de la calcul.
Ammoniaque.	1,303.	1,210.	+ 0,093
Oxide d'azote.	1,710.	1,482.	+ 0,228
Gaz nitreux.	1,030.	0,972.	+ 0,058
Eau.	1,000.	0,933.	+ 0,067
Gaz chlor-oxi-carb. .	3,936.	3,784.	+ 0,152
Éther muriatique. . .	3,720.	3,829.	- 0,099
Acide hydrocyanique. .	1,521.	1,651.	- 0,130
Acide carbonique. . .	1,526.	1,629.	- 0,093
Acide hydrochlorique. .	1,527.	1,547.	- 0,020

Les différences sont trop sensibles pour qu'on puisse les attribuer à des erreurs d'observation, et il est impossible de supposer qu'elles tiennent à un défaut de pureté dans les gaz, parce que l'on connaît l'habileté de M. Dulong et la scrupuleuse exactitude qu'il apporte dans ses préparations.

4°. Le pouvoir réfringent d'une substance à l'état liquide est plus grand que le pouvoir réfringent de la même substance à l'état gazeux. Ce principe qui avait été autrefois établi sur des expériences directes par MM. Arago et Petit (*Ann. de chim. et de phys.*, t. 1, p. 1), se trouve de nouveau confirmé par les résultats de M. Dulong. En effet, le pouvoir réfringent de carbure du soufre par rapport à l'air est égal à sa puissance réfractive par rapport à l'air 5,179 divisée par sa densité 2,644, ce qui donne 1,932; le carbure de soufre liquide a une densité 1,263, et son indice de réfraction est 1,678, sa puissance réfractive absolue est donc 1,816 et son pouvoir réfringent absolu 1,438. Mais l'air ayant une puissance réfractive absolue de 0,000583 et une densité par rapport à l'eau de 0,001299, son pouvoir réfringent absolu est 0,453. Par conséquent le pouvoir réfringent du carbure de soufre liquide par rapport à l'air est 1,438 divisé par 0,453 ou 3,176. Ainsi le carbure de soufre a un pouvoir réfringent plus grand que 3 à l'état liquide, et plus petit que deux à l'état gazeux. Il paraît que MM. Arago et Petit avaient étendu leurs expériences à plusieurs liquides volatils; mais leurs résultats n'ont pas été publiés, et faute de connaître les indices de réfraction des éthers muriatique et sulfurique et de l'acide hydrocyanique à l'état liquide, nous ne pouvons ici profiter des expériences de M. Dulong pour comparer les pouvoirs réfringents de ces substances à l'état de vapeur et à l'état liquide.

Si le pouvoir réfringent d'un gaz augmente à l'instant où il se liquéfie, il est bien probable qu'il commence à éprouver quelque changement lorsqu'il approche de son point de condensation, soit qu'il s'y trouve amené par la pression ou par le refroidissement; c'est aussi ce qui résulte des expériences de M. Dulong sur l'éther muriatique, le carbure de soufre et l'éther sulfurique, car, au maximum de densité, leurs puissances réfractives par rapport à l'air sont respectivement 3,87, 5,198 et 5,200. Au lieu de 3,72, 5,110 et 5,197.

LENTILLES.

534. *Propriétés générales des lentilles.* — Les lentilles sont des corps diaphanes, qui ont la propriété d'augmenter ou de diminuer la convergence naturelle des faisceaux de lumière qui les traversent.

Nous ne devons étudier ici que les *lentilles sphériques*, c'est-à-dire, celles dont les surfaces sont des plans ou des sphères, parce qu'elles sont à peu près les seules qui entrent dans la composition des

divers instruments d'optique ; les lentilles *elliptiques*, *paraboliques*, *cylindriques*, etc., présentent bien aussi des phénomènes analogues, mais elles sont plus difficiles à travailler, et jusqu'à présent on n'en a fait aucun usage important.

En combinant de toutes les manières possibles les surfaces planes et sphériques on ne peut former que six lentilles différentes (Fig. 611 et suivantes).

La première (Fig. 611), est la lentille *bi-concave* ; elle est formée de deux surfaces sphériques concaves dont les rayons ca et $c'a'$ peuvent être égaux ou inégaux.

La deuxième (Fig. 612), est la lentille *plan-concave* ; elle est formée par un plan et par une surface sphérique concave dont le rayon ca peut être quelconque.

La troisième (Fig. 613), est la *menisque-convergente* ; elle est formée par deux surfaces sphériques, l'une concave et l'autre convexe, le rayon ca de la première étant plus grand que le rayon $c'a'$ de la seconde.

La quatrième (Fig. 614), est la lentille *bi-convexe* ; elle est formée par deux surfaces sphériques convexes, dont les rayons ca et $c'a'$ peuvent être égaux ou inégaux.

La cinquième (Fig. 615), est la lentille *plan-convexe* ; elle est formée par un plan et par une surface sphérique convexe dont le rayon ca peut être quelconque.

La sixième enfin (Fig. 616), est la *menisque-divergente* ; elle est formée par deux surfaces sphériques, l'une concave et l'autre convexe, le rayon ca de la première étant plus petit que le rayon $c'a'$ de la seconde.

Les trois premières sont à *bords tranchants*, c'est-à-dire qu'elles sont moins épaisses au bord qu'au milieu ; nous verrons qu'elles sont *convergentes*, eu, en d'autres termes, qu'elles augmentent la convergence en diminuant la divergence des faisceaux qui les traversent.

Les deux dernières sont à *bords larges*, c'est-à-dire, qu'elles sont plus épaisses au bord qu'au milieu ; nous verrons qu'elles sont *divergentes*, ou, en d'autres termes, qu'elles diminuent la convergence ou augmentent la divergence des faisceaux qui les traversent.

L'axe d'une lentille est la ligne mathématique cc' qui joint les deux centres de courbure de ses deux surfaces ; pour les lentilles plan-concaves et plan-convexes, l'axe cc' est la perpendiculaire abaissée du centre de courbure sur le plan.

Dans l'épaisseur d'une lentille et sur son axe, se trouve un point particulier que l'on nomme le *centre optique* ; tous les rayons de lumière qui passent par ce point prennent, en sortant de la lentille, une direction parallèle à celle qu'ils avaient en y entrant.

On démontre par le calcul que si un point lumineux L (Fig. 618), est placé sur l'axe d'une len-

tille à bords tranchants, tous les rayons qu'il envoie sur la lentille et qui la traversent, viennent après leur sortie se concentrer sur l'axe en un même point F . Cette propriété est toujours soumise à certaines conditions que nous examinerons plus tard ; mais elle a lieu exclusivement pour les lentilles à bords tranchants, et c'est pour cette raison qu'on les appelle lentilles *convergentes*. Le point F est le *foyer* du point L , et ces deux points pris relativement sont des foyers conjugués l'un de l'autre, c'est-à-dire, que si le point lumineux était en F les rayons réfractés iraient se concentrer en L , (Fig. 618).

Pour un point placé à l'infini, tous les rayons incidents sont parallèles entre eux (Fig. 619) ; le foyer F se nomme alors *foyer principal* de la lentille et la distance FC *distance focale principale*.

L'angle $2F'$, sous lequel la lentille est vue du *foyer principal*, se nomme *l'ouverture* de la lentille ; cet angle ne doit pas dépasser 20 ou 30° ; s'il était plus grand, les rayons qui traversent les bords ne viendraient pas concourir exactement au point F comme les rayons plus voisins de l'axe, et il y aurait une *aberration de sphéricité* plus ou moins grande.

Pour un point lumineux situé hors de l'axe en L' , par exemple (Fig. 618), les phénomènes sont les mêmes que pour le point L ; seulement ils se produisent alors à l'égard de l'axe *secondaire* $L'C$ que l'on obtient en joignant le point L' au centre optique C .

Ainsi un faisceau $s s'$, parallèle et oblique à l'axe principal (Fig. 619), fait son foyer en F' sur la ligne $C X$ menée par le centre optique parallèlement aux rayons 12 , $1'2'$, etc., et l'on a $C F' = C F$.

Cependant, et ceci est une remarque importante, si l'axe *secondaire* d'un faisceau faisait avec l'axe principal un angle plus grand que 45 ou 50 degrés, tous les rayons de ce faisceau ne convergeraient plus exactement au même point après leur réfraction ; il y aurait une aberration de sphéricité, et l'on dirait alors que les points lumineux sent hors du champ de la lentille.

Il en résulte qu'un objet à L' (Fig. 618), qui serait compris dans le champ de la lentille et placé sur la surface d'une sphère ayant son centre au centre optique C , donnerait une image renversée très nette, sur la surface $F'F'$ d'une autre sphère ayant le même centre. Ainsi les objets font des images au foyer des lentilles comme au foyer des miroirs, et, vu du centre optique de la lentille, l'image et l'objet sont vu sous le même angle.

Il nous reste à voir maintenant comment le foyer principal dépend de la courbure de la lentille et de la nature de sa substance, puis à déterminer comment la distance des images dépend de la distance des objets.

636. *Discussion des formules qui expriment la théorie des lentilles.*

Toute la théorie des lentilles est exprimée par les deux formules suivantes :

$$1^{\circ}. \quad \frac{1}{x} = \frac{1}{f} - \frac{1}{x'}$$

$$2^{\circ}. \quad f = \frac{xx'}{(x-1)(x'-1)}.$$

Nous pouvons admettre ces formules comme un résultat du calcul, et nous devons surtout nous attacher à en faire comprendre le sens et l'usage par une discussion détaillée; car elles contiennent le principe de la construction de tous les instruments d'optique. La première indique la relation qui existe entre la distance focale principale f , la distance de l'objet x et celle de son image x' ; toutes ces distances étant comptées à partir du centre optique, soit sur l'axe principal, soit sur les axes secondaires. La seconde indique la relation qui existe entre la distance focale principale f , les rayons de courbure a et a' de la lentille et de l'indice n de réfraction de sa substance.

f restant le même, a peut recevoir toutes les valeurs depuis l'infini jusqu'à 0, et à chacune d'elles correspond une valeur particulière de n ; le tableau suivant contient les valeurs correspondantes les plus remarquables.

$$1^{\circ}. \quad x = \infty \dots x' = f.$$

$$2^{\circ}. \quad x = 100 f. \quad x' = \frac{100}{99} f = f + \frac{f}{99}$$

$$3^{\circ}. \quad x = 2 f. \quad x' = 2 f,$$

$$4^{\circ}. \quad x = f. \quad x' = \infty$$

$$5^{\circ}. \quad x = \frac{f}{2} \dots x' = -f$$

1° . $x = \infty$, signifie que l'objet est placé à une distance infinie, et $x' = f$, que l'image se forme alors au foyer principal (Fig. 619); c'est-à-dire, à 3 pieds si la distance focale principale est de 3 pieds, et à 10 si elle est de 10 pieds. Ce résultat est de vérité nécessaire, puisqu'on appelle foyer principal le foyer des rayons parallèles. Mais on peut vérifier par l'expérience que la grandeur absolue de l'image est telle que si on la regardait du centre optique de la lentille on la verrait sous le même angle que l'objet. Il suffit pour cela de recevoir l'image solaire sur un écran à la distance où elle paraît avec le plus d'éclat et de netteté, de l'observer avec un verre noir et d'en mesurer la grandeur. On conçoit que si l'écran était de bois ou de papier, il prendrait feu presque à l'instant.

On peut encore faire l'expérience d'une manière plus commode en couvrant la lentille d'une feuille de carton, percée d'un trou très petit, soit au centre, soit vers les bords. Quelque petite que l'on donne à cette ouverture, l'image a toujours la même grandeur, c'est seulement son éclat qui s'affaiblit.

2° . $x = 100 f$ signifie que l'objet est placé à 100 fois la distance focale principale; par exemple, à 300 pieds si cette distance est de 3 pieds, et puisque l'image se forme alors à f plus un 99^{e} de f on voit qu'elle n'a reculé que de la 99^{e} partie de f pendant que l'objet s'est avancé depuis l'infini jusqu'à 100 f .

Pour vérifier ce résultat, on peut prendre une lentille d'un long foyer, et après en avoir déterminé la distance focale principale par l'expérience précédente, on cherchera avec un écran le lieu de l'image d'un objet placé très loin et à une distance connue, si cette distance est juste de 100 f , l'image sera juste reculée de la 99^{e} partie de f .

3° . Quand l'objet est placé à une distance double de la distance focale principale, l'image est de l'autre côté de la lentille exactement à la même distance, et par conséquent de la même grandeur. C'est ce que l'on peut vérifier avec la flamme d'une bougie, ou même avec la lumière solaire; dans ce dernier cas, on place la lentille à la distance $2 f$ du trou de la chambre noire par lequel entre le faisceau de lumière solaire, et l'on constate que c'est à $2 f$ derrière la lentille que l'image du trou se fait avec netteté. Ainsi pendant que l'objet s'avance depuis l'infini jusqu'à $2 f$, l'image recule seulement depuis f à $2 f$.

4° . Quand l'objet est placé au foyer principal, son image va se faire à l'infini, c'est-à-dire que les rayons émergents sont parallèles; ainsi l'objet et l'image ont changé de rôle; pendant que l'objet s'avance de $2 f$ à f l'image recule depuis $2 f$ jusqu'à l'infini. Ce résultat peut être vérifié à peu près avec la flamme d'une bougie; je dis à peu près, parce que la flamme ayant une certaine épaisseur, tous ses points ne peuvent être à la fois à la distance focale principale. On obtient plus d'exactitude à cet égard en prenant pour objet l'image formée au foyer d'une première lentille; comme cette image n'a point d'épaisseur, on peut le mettre complètement à la distance focale principale de la seconde lentille (Fig. 606), alors le faisceau émergent x' est tout-à-fait parallèle. Il est bon dans cette expérience de mettre un diaphragme $c'c'$, pour arrêter les rayons colorés des bords.

5° . Enfin, quand l'objet est à une distance moindre que la distance focale principale, on obtient pour x' une valeur négative; ce changement de signe annonce un changement dans la position du foyer, et en effet le foyer se fait alors en avant de la lentille (1) (Fig. 620). Dans ce cas, la lentille

(1) On sera étonné peut-être que les valeurs de x' deviennent négatives quand elles sont comptées de même côté que x dont les valeurs sont toujours positives. Mais cela tient à ce que nous avons pris positivement pour éviter les changements de signe qui auraient pu embrouiller cette discussion. La formule algébrique

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{f} - \frac{1}{x'}$$

comme pour les lentilles divergentes s'appliquant dans le cas il faut donner à f des valeurs négatives.

diminue seulement la divergence; il n'y a plus qu'un foyer virtuel et une image virtuelle; les rayons émergents sont comme s'ils partaient du point v .

La formule que nous venons de discuter ne s'applique qu'aux lentilles convergentes; celle des lentilles divergentes a la forme suivante :

$$\frac{1}{s} = \frac{1}{r} + \frac{1}{s'}$$

Pour $s = \infty$ elle donne $s' = r$; ainsi les rayons parallèles sont après leur émergence, comme s'ils partaient du point r (Fig. 621);

Pour $s = r$ elle donne $s' = -\infty$, c'est-à-dire que

les rayons émergents sont comme s'ils partaient d'un point placé en avant de la lentille à égale distance du foyer et du centre optique.

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que la valeur de la distance focale principale était connue, ou du moins que l'on pouvait la déterminer par l'expérience; mais on conçoit que l'artiste qui travaille les verres travaillerait toujours au hasard s'il ne pouvait trouver la distance focale d'une lentille que quand elle est faite. Il faut que la science lui apprenne à la trouver d'avance, et lui indique quelle courbure il doit donner à ses verres pour obtenir des foyers d'une longueur donnée. C'est l'objet de la seconde formule que nous avons rapportée plus haut que nous allons maintenant discuter.

$$r = \frac{a a'}{(a - 1)(a' - a)}$$

r , distance focale principale.

a , rayon de courbure de la première surface.

a' , rayon de courbure de la deuxième surface.

n , rapport de réfraction de la substance de la lentille.

Il résulte des suppositions par lesquelles cette formule a été obtenue :

1°. Que a représente toujours le rayon de courbure de la première surface, c'est-à-dire, de la surface par laquelle entre la lumière, et a' celui de la deuxième surface ou de la surface d'émergence.

2°. Que les rayons de courbure a et a' doivent être pris positivement quand le centre de la surface à laquelle ils appartiennent se trouve du côté par lequel entre la lumière, et négativement quand il se trouve du côté opposé.

3°. Que la lentille sera convergente ou divergente, suivant que la valeur de r sera négative ou positive.

Il est facile de voir d'après cela que, pour chaque espèce de lentille on a les résultats suivants, qui seraient les mêmes, en définitive, si l'on retournerait la lentille, c'est-à-dire, si l'on prenait pour la première surface celle que nous avons prise pour la deuxième et réciproquement.

Lentille biconvexe. $a = -, a' = +, r = -$
Plan convexe $a = -, a' = \infty, r = -$
Menisque convergent. $a = -, a' = -, r = -$

parce que $a < a'$

Biconcave. $a = +, a' = -, r = +$
Plan concave. $a = +, a' = \infty, r = +$
Menisque divergent. $a = -, a' = -, r = +$

parce que $a > a'$.

Ainsi, les trois lentilles à bords tranchants, sont comme nous l'avons annoncé, des lentilles convergentes, tandis que les trois lentilles à bords larges sont divergentes.

Quant aux valeurs absolues de r , elles seront faciles à calculer lorsqu'on connaîtra a , a' et n . Réciproquement les valeurs de r et de n étant données on pourra déterminer ou les valeurs absolues des rayons de courbure ou du moins la relation qui existe entre elles.

Si l'on voulait, par exemple, faire avec du verre une lentille biconvexe de 4 pieds de distance focale principale, dont les deux rayons de courbure fussent égaux, l'on trouverait que chacun de ces rayons doit aussi avoir 4 pieds.

Pour obtenir la même distance focale avec une lentille plan convexe, on trouverait que le rayon de courbure doit être seulement de 2 pieds.

Pour l'obtenir avec un menisque convergent dans lequel le grand rayon serait double du petit, on trouverait que celui-ci doit être de 1 pied seulement et l'autre de 2 pieds, celui-ci appartient à la surface concave.

Enfin, pour fabriquer avec le même verre une lentille divergente de même distance focale, il faudrait employer des rayons de mêmes grandeurs respectives que les précédents, c'est-à-dire, deux rayons de 4 pieds pour la lentille biconcave, un rayon de 2 pieds pour la lentille plan concave, et deux rayons l'un de 1 pied et l'autre de 2 pieds pour le menisque divergent, ce dernier appartenant alors à la surface convexe.

Pour compléter cette discussion il y aurait encore à examiner le cas où le faisceau qui tombe sur une lentille convergente ou divergente est un faisceau déjà convergent et non pas un faisceau parallèle ou divergent comme nous l'avons supposé; mais ces détails sont des conséquences si simples de ce que nous avons dit, qu'on n'éprouvera sans doute aucune difficulté à en faire l'analyse.

536. *Lentilles à échelons*. — Ces lentilles se composent d'une lentille ordinaire plan convexe $a a'$, (Fig. 617), et de pièces sphéro-prismatiques annulaires $a a'$, $c c'$, $b b'$, etc., qui s'enveloppent exactement l'une l'autre; chacun de ces anneaux est travaillé pour remplir deux conditions; 1° pour que la lumière parallèle qu'il reçoit puisse le traverser librement sans tomber sur la surface latérale l qui reste dépolie; 2° pour que la lumière qui le traverse vienne faire son foyer au même lieu que la lumière qui traverse la lentille centrale $a a'$; c'est

surtout pour remplir cette dernière condition qu'il faut calculer convenablement les courbures des faces b , c , d , etc. Par cet artifice on peut donner aux lentilles à échelons beaucoup plus d'ouverture qu'aux lentilles ordinaires, et, de plus, le verre n'ayant que peu d'épaisseur il n'absorbe qu'une faible proportion de lumière. Au foyer d'une telle lentille, de 20 ou 24 pouces de diamètre et de 12 à 15 pouces de distance focale principale, l'image du soleil a un très vif éclat, et la chaleur qu'elle donne est capable de brûler rapidement l'étain, le zinc, le cuivre ou le fer, et de fondre des feuilles d'or ou même de platine.

Buffon avait eu l'idée de construire des lentilles de cette espèce; mais on ne put jamais en obtenir de bons résultats parce qu'on voulait les tailler dans une seule pièce de verre. Ces essais étaient tombés dans l'oubli, quand Fresnel fut ramené de nouveau à la même invention par une autre voie, et avec un

succès complet. Fresnel calcula les courbures de chaenn des anneaux, et indiqua les procédés pour les travailler avec une exactitude suffisante. Il fit ensuite avec M. Arago des expériences sur les meilleurs moyens de produire une vive lumière au foyer de ces lentilles. Il en est résulté pour l'établissement des phares un nouveau système qui a une grande supériorité sur les systèmes anciens, et qui est adopté maintenant pour toutes les côtes de France. Déjà, le phare de Cordouan établi sur ces principes, montra les immenses avantages que la navigation en pourra tirer. Une lampe à quatre mèches concentriques, placée au foyer de ces lentilles, devient visible en mer jusqu'à la distance de 10 ou 12 lieues, et les apparences de chaque feu peuvent être diversifiées pour ainsi dire à volonté, de manière qu'il ne reste aux navigateurs aucune chance pour confondre deux feux voisins.

CHAPITRE III.

DÉCOMPOSITION ET RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE.

537. *La lumière blanche du soleil se compose de rayons diversement colorés.* Cette vérité fondamentale ne peut être établie que par une série d'expériences : premièrement, on dispose devant le volet de la chambre noire un miroir de métal xx' qui réfléchisse, dans une direction donnée, le faisceau de lumière solaire qu'il reçoit. Supposons, par exemple, que ce faisceau soit réfléchi horizontalement, et qu'après avoir pénétré dans la chambre noire par une ouverture circulaire de 4 ou 5 millimètres de diamètre, il se propage dans la direction ee (Fig. 622). En e , sur le tableau, il porte une image ronde du soleil qui est représentée de face en ee' , (Fig. 623). Le diamètre de cette image augmente avec la distance du tableau, suivant une loi très simple. Secondement, l'on dispose près du volet un prisme aaa' de verre ou de flint, et le faisceau primitif est non-seulement réfracté dans la direction ra , mais il apporte en v une image oblongue et colorée, qui est le *spectre solaire*, figures 622 et 623.

On peut alors démontrer que le spectre est soumis aux trois conditions suivantes : 1° que parallèlement aux arêtes du prisme, son diamètre vv' est toujours égal au diamètre nn' de l'image directe, qui serait reçue à la même distance; 2° que, perpendiculairement aux arêtes, sa longueur av est dépendante de l'angle réfringent du prisme et de la nature de sa substance; 3° que quand a v est moindre que le double de nn' , le spectre est blanc

vers le milieu et coloré seulement vers les extrémités a et v , et qu'il est complètement coloré dans toute sa longueur, quand av est plus grand que le double de nn' .

Pour constater le premier de ces résultats, il suffit de répéter l'expérience précédente avec des prismes de substances très différentes, et d'angles réfringens quelconques.

Pour constater le second, l'on peut employer le *prisme variable*, qui est représenté dans la fig. 624. Le pied r , et les deux bouts rr' et $s's'$ sont en cuivre; tandis que les deux faces ra et $r'a'$ sont des lames de verre montées dans des cadres en métal; l'une d'elles est fixe, l'autre est mobile et peut être parallèle, ou inclinée à la première sous des angles différens. Cet appareil substitué au prisme aaa' de la fig. 622, n'imprime d'abord aucune déviation au faisceau direct; ce qui prouve le parallélisme des deux côtés dans chacune des lames ra et $r'a'$; mais lorsqu'on y verse un liquide transparent, on voit à l'instant le faisceau se dévier et se décomposer. Ensuite, on fait varier à la fois la déviation et la coloration, en inclinant plus ou moins la face r' sur la face r . Pour faire voir ensuite que la longueur du spectre dépend de la nature de la substance du prisme, on peut d'abord, pour les liquides, verser successivement divers liquides dans le *prisme variable*, en lui conservant le même angle et observer les longueurs des spectres correspondans; mais, pour

les solides, on se sert du *polyprisme* qui est représenté dans la fig. 625, cet appareil est un assemblage de prismes de différentes substances superposés bout à bout et ayant tous le même angle réfringent ; en le promenant devant l'ouverture on oblige le faisceau à traverser successivement les diverses substances avec la même obliquité, et l'on obtient ainsi des spectres inégalement déviés, et inégalement colorés.

Enfin, pour constater le troisième résultat on peut se servir encore du prisme variable, en partant du point où la face r' est parallèle à la face r , et en augmentant l'angle graduellement : d'abord l'image est ronde et blanche, puis oblongue et colorée aux deux bouts seulement ; puis quand le spectre est bien développé, et que la séparation des couleurs est complète, on distingue sur sa longueur les sept nuances suivantes :

Rouge,
Orangé,
Jaune,
Vert,
Bleu,
Indigo,
Violet.

Il importe de remarquer qu'elles sont toujours dans le même ordre relatif, et que, par rapport au prisme, c'est toujours le rouge qui éprouve la moindre déviation. Ce sont ces nuances que l'on appelle ordinairement les *couleurs du prisme*, les *couleurs du spectre*, les *couleurs de l'iris* ou de l'*arc-en-ciel*, les *couleurs simples*, etc. ; mais nous verrons que si nos yeux ne comptent que sept couleurs dans le spectre, il est vrai de dire cependant qu'il y en a une infinité.

La séparation des couleurs a lieu d'une manière assez complète, quand on reçoit le spectre à 6 mètres de distance, le prisme ayant un angle réfringent de 60° , et l'ouverture du volet étant un cercle de 1 centimètre de diamètre. Cependant elle est plus complète encore quand l'ouverture est plus petite : c'est ce que l'on peut apprécier par une seule expérience, en faisant tomber simultanément sur le prisme plusieurs faisceaux par des ouvertures voisines comme les représente la fig. 205, ou, mieux encore, en faisant tomber un seul faisceau par un triangle isocèle très allongé, dont la hauteur xx soit parallèle aux arêtes du prisme (Fig. 627).

Pour donner au spectre des limites plus nettes et mieux tranchées, on peut encore adopter la disposition suivante qui a été employée par Newton. A 4 mètres de l'ouverture 0 (Fig. 628), on place une lentille ayant 2 mètres de distance focale principale, sur laquelle on fait tomber un faisceau de lumière solaire ; alors l'image de l'ouverture va se peindre de grandeur naturelle en o' , à la même distance de 4 mètres (535, 3^e) ; mais immédiatement derrière la lentille, on place le prisme xxs' ,

qui décompose la lumière incidente et donne en xv un spectre qui est nettement défini, et très brillant, parce qu'il contient dans un bien moindre espace toute la lumière qu'il contiendrait, si la lentille n'y était pas.

Dans toutes les expériences précédentes et dans les suivantes, nous supposons que les arêtes du prisme sont horizontales ; mais, dans les appartements ordinaires, il est plus commode de les disposer verticalement. Dans tous les cas, il faut avoir le plus grand soin d'éviter la lumière diffuse, et surtout la lumière des nuées qui entre par l'ouverture.

538. *Les rayons différemment colorés sont différemment réfringibles.*

Cette vérité résulte déjà de la forme dilatée du spectre ; car il est évident que la lumière violette, qui tombe en v (Fig. 622), forme, au sortir du prisme, un angle d'émergence plus grand que la lumière rouge qui tombe en r ; et comme elles ont l'une et l'autre une même incidence sur la première face du prisme, il faut bien en conclure que le violet est plus réfringible que le rouge. Le même raisonnement fait voir que les nuances intermédiaires ont des réfringibilités intermédiaires.

Mais voici quatre expériences qui conduisent à la même conséquence d'une manière plus directe et plus frappante.

1^o. On reçoit les spectres sur un écran xx' (Fig. 629), percé d'une petite ouverture o' ; derrière cette ouverture on fixe dans une position déterminée un second prisme qui fait éprouver une seconde réfraction à la lumière, et l'on marque sur le tableau xx' le point où vient tomber l'image. Or, en faisant tourner le premier prisme, on peut faire passer successivement toutes les nuances par l'ouverture o' de l'écran, et l'on reconnaît ainsi que le violet, par exemple, tombe en v' , après la seconde réfraction, l'indigo un peu plus bas, le bleu un peu plus bas encore, et enfin, le rouge en r' . Donc, dans le premier spectre, l'ordre des nuances que nous avons indiqué donne aussi l'ordre des réfringibilités.

2^o. L'expérience des *prismes croisés* conduit au même résultat ; elle est encore plus simple et plus facile. On marque sur le tableau le lieu o' de l'image solaire qui est formée par le faisceau direct (Fig. 631). Ensuite on place à quelques centimètres derrière l'ouverture, un prisme horizontal r , qui produit sur le tableau un spectre xxv ; enfin on place un prisme vertical r' , à quelques centimètres derrière le premier, et l'on obtient un spectre $xx'v'$. Par ce second prisme, la lumière rouge, qui allait tomber en r , est réfractée en r' , et la lumière violette, qui allait tomber en v , est réfractée en v' , l'obliquité du spectre $xx'v'$ est une preuve que la réfringibilité va croissant depuis le rouge jusqu'au violet, puisque toutes les couleurs ayant la même incidence à leur entrée dans le second prisme, ont

en sortant des angles d'émergence croissant depuis le rouge jusqu'au violet.

Les prismes sont ponctués dans la figure, parce qu'ils sont bien loin du tableau sur lequel nous les avons rapportés.

3°. On fait tomber successivement toutes les nuances du spectre sur une carte imprimée en caractères très fins, et après avoir placé au-devant de cette carte une lentille ayant une grande distance focale principale, ou va recevoir à une distance convenable, sur un carton blanc, l'image des lettres au point où elles sont le plus nettement dessinées; on reconnaît ainsi que, pour la lumière rouge, le carton doit être très sensiblement plus loin que pour l'orangée, et pour celle-ci plus loin que pour le jaune, etc., etc.

4°. On dispose un prisme rectangulaire, de manière que le faisceau réfracté se présente pour sortir par l'hypoténuse (Fig. 630), et il sort en effet sous une certaine obliquité pour donner naissance à un spectre à *v*; mais en inclinant le prisme graduellement, on reconnaît bientôt que ce spectre devient incomplet; le violet disparaît d'abord, puis l'indigo, le bleu, etc., et enfin le rouge, qui disparaît le dernier. Ces couleurs disparaissent lorsqu'elles tombent sur l'hypoténuse avec une assez grande obliquité pour éprouver la réflexion totale (626), et puisqu'elles disparaissent successivement en commençant par le violet, c'est une preuve qu'elles ont des réfrangibilités décroissantes à partir du violet.

Les expériences précédentes ne s'appliquent pas seulement aux sept nuances que nous avons remarquées dans le spectre, mais elles s'appliquent aussi aux divers rayons d'une même nuance. Par exemple, le rouge *a*, qui est tout-à-fait à l'extrémité du spectre (Fig. 628), et que l'on appelle pour cette raison le *rouge extrême*, se trouve sensiblement moins réfrangible que le *rouge moyen*, et à plus forte raison moins réfrangible que le *rouge limite de l'orangé*. Il en est de même de tous les rayons dans toute la longueur du spectre, depuis le *rouge extrême*, jusqu'au violet extrême. C'est cette réfrangibilité graduellement croissante, qui nous conduit à admettre qu'il y a dans la lumière blanche une infinité de couleurs différentes: en effet, si l'on regarde attentivement le rouge extrême et le rouge moyen, on reconnaît bientôt qu'ils ne donnent pas la même teinte; en parcourant d'un bout à l'autre toute l'étendue du spectre, on peut s'assurer qu'il y a une dégradation continue ou plutôt un changement de teinte continu d'une teinte à la suivante. Il ne faut donc pas supposer avec quelques auteurs, que Newton n'a vu que sept nuances ou sept couleurs dans le spectre; il en a vu une infinité, et c'est seulement pour fixer les idées, qu'il a donné des noms aux couleurs qui sont pour l'œil les plus apparentes et les plus distinctes.

Cette observation nous permet de faire mainte-

nant une analyse plus complète de la lumière blanche et du spectre qu'elle produit: imaginons, pour un instant, qu'il n'y ait dans la lumière blanche que le rouge extrême et le violet extrême; alors il est clair qu'au lieu d'un spectre, nous aurions seulement deux images du soleil, rouges, colorées et séparées, l'une rouge en *a*, et l'autre violette en *v* (Fig. 632). Mais le rouge qui avoisine le rouge extrême, et qui est un peu plus réfrangible que lui, donne aussi une image ronde qui se superpose en grande partie sur la première, en se rapprochant du violet (Fig. 632 bis). Le rouge suivant donne encore une image pareille, qui se superpose en grande partie sur la précédente, et ainsi de suite jusqu'au violet extrême. Ainsi, dans les expériences ordinaires, le spectre est composé d'une infinité d'images circulaires empiétant les unes sur les autres, et rigoureusement parlant, une seule étroite quelconque *ab*, faisant partie d'un grand nombre de cercles voisins, se trouve composée d'un grand nombre de lumières qui diffèrent en couleur et en réfrangibilité; seulement, si les cercles sont d'un petit diamètre, les couleurs seront à peu près identiques, et les réfrangibilités à peu près égales; c'est pourquoi cette zone peut être considérée comme composée d'une seule et même lumière.

639. *Chaque couleur du spectre est une couleur simple.* — Une couleur est simple quand elle se retrouve toujours la même sans qu'il soit possible par aucune action d'en faire sortir des nuances différentes, et nous allons faire voir qu'en effet les couleurs du spectre peuvent bien être détruites, mais qu'elles ne peuvent par aucun cause être modifiées pour nos yeux. Elles sont en cela bien différentes des couleurs naturelles des corps; car celles-ci peuvent toutes, comme nous le verrons bientôt, donner naissance à des teintes élémentaires tout-à-fait distinctes des teintes primitives. Dans le vermillon, par exemple, nous pourrions développer du jaune, nous développerions du vert dans l'indigo; et des plus vives couleurs que nous offre la nature, il n'y en a pas une qui ne puisse être décomposée de la sorte.

La simplicité ou l'inaltérabilité des couleurs du spectre se démontre par une foule d'expériences entre lesquelles nous choisirons seulement les suivantes.

1°. Après avoir isolé, avec un écran percé d'un petit trou, un morceau quelconque du spectre, le violet, par exemple, on peut le faire passer par un nombre quelconque de prismes, de lentilles ou d'autres réfringens, sans y découvrir d'autre nuance que le violet primitif.

2°. Si l'on fait tomber ce morceau violet sur un corps d'une couleur différente, rouge, jaune, vert, etc., ce corps devient violet, sans qu'on puisse y découvrir aucune trace de la couleur primitive qu'il offre naturellement et qui lui semble propre et inhérente. On en peut faire l'expérience

sur les feuilles des plantes, les fleurs, le vermillon, l'or, etc., etc.; tous ces corps prennent alors la même nuance, ils deviennent violots comme si cette couleur était leur véritable couleur naturelle. Parfaitement, dans le rouge, tous les corps sont rouges, jaunes dans le jaune, verts dans le vert, etc.

3°. Un pinceau violet qui se présente pour traverser un corps diaphane rouge, jaune ou vert, se trouve absorbé et détruit, ou bien, s'il passe, il est violet à sa sortie comme il l'était à son entrée. Cette expérience est surtout frappante avec des verres colorés en rouge : tel de ces verres laisse passer librement la lumière violette, telle autre l'absorbe en totalité; bien qu'à les regarder tous deux à la lumière du ciel ils paraissent également colorés et également transparents. Celui qui absorbe le violet, absorbe en général toutes les autres nuances du spectre, excepté le rouge; ainsi, c'est un corps transparent pour le rouge, et plus ou moins opaque pour les autres couleurs.

On dit quelquefois, d'après Newton, que la lumière simple est homogène, mais cette expression est inexacte, parce qu'elle semble indiquer que toutes les parties de cette lumière éprouvent toujours les mêmes effets; or, il est facile de vérifier, qu'un rayon de lumière simple, est en partie réfléchi à la surface d'un corps diaphane, et en partie réfracté dans son intérieur; ainsi, ces deux parties ne sont pas identiques, puisqu'elles éprouvent des effets différents. Il en est de même lorsqu'on fait tomber un pinceau de lumière simple sur un corps doué de la double réfraction, car ce pinceau se partage alors en deux autres qui suivent des routes différentes. En général, il n'arrive presque jamais qu'un rayon simple du spectre éprouve identiquement les mêmes effets dans tout son ensemble.

540. On recompose la lumière blanche en ramenant toutes les couleurs simples dans la même direction ou en les faisant toutes concourir au même point.

Quand les couleurs ont été séparées par un prisme, on peut les ramener dans la même direction par un second prisme de même substance et de même angle réfringent que le premier, mais tourné en sens inverse (Fig. 633). Alors le faisceau, qui est coloré entre les deux prismes, devient blanc au sortir du second, et va peindre sur le tableau une image ronde du soleil. Si le second prisme est à larges faces, on peut le placer très loin du premier, de telle sorte qu'il reçoive un spectre très complet. Cette expérience montre assez clairement qu'il n'y a dans un prisme aucune force particulière pour décomposer la lumière blanche ou pour la recomposer, mais que la séparation des couleurs simples ou leur réunion se fait d'elle-même par l'inégale réfrangibilité des divers rayons. Pour opposer deux prismes qui soient exactement de même angle, on peut encore employer une cuve

rectangulaire de glace, séparée en deux compartiments prismatiques, par une cloison diagonale, parallèlement on glace c'c' (Fig. 638). Lorsqu'on met de l'eau dans le premier compartiment, le faisceau émergeant forme un spectre; mais il reprend sa direction et sa blancheur primitive, dès qu'on remplit d'eau le second compartiment comme le premier.

Il n'est pas nécessaire que toutes les couleurs simples soient, comme dans l'expérience précédente, ramenées dans la même direction pour former du blanc; il suffit seulement qu'elles enroulent au même point, comme nous allons le voir par les expériences suivantes.

1°. On reçoit le spectre sur un grand miroir concave mn (Fig. 634), et l'on dirige le faisceau réfléchi, soit dans le faisceau incident lui-même, soit au dehors, comme le représente la figure. Alors, toutes les nuances du spectre réfléchies dans des directions différentes viennent concourir au même point r , et là, l'image solaire reçue sur un petit écran ou sur un verre dépoli paraît d'une blancheur éblouissante, comme si le faisceau incident était un faisceau de lumière directe. Il suffit donc du concours de toutes les nuances simples pour produire du blanc. Mais si, au lieu de recevoir le faisceau réfléchi au foyer même où le concours est complet, on le reçoit plus près ou plus loin du miroir, on n'observe qu'une recomposition imparfaite; plus près les couleurs extrêmes du spectre reparaissent dans leur ordre, plus loin elles reparaissent dans un ordre inverse en n' . Enfin, si l'on place au foyer un petit miroir métallique très poli mm' , il n'y a aucun doute que la lumière qui tombe sur lui ne soit blanche comme celle qui tombait tout à l'heure sur l'écran, et cependant l'image réfléchie par ce miroir est un spectre st ; ce qui prouve évidemment qu'en se réunissant au foyer les divers rayons conservent leur existence indépendante et ne se modifient nullement les uns les autres.

2°. On reçoit le spectre sur une lentille lt (Fig. 635), et au point r où convergent tous les rayons divers, on obtient une lumière blanche comme au foyer du miroir précédent. L'image ronde qui en résulte est seulement colorée vers ses bords, parce que les rayons de réfrangibilités différentes ne peuvent pas faire leur foyer exactement à la même distance derrière la lentille. Au delà du foyer le spectre reparaît, mais renversé en $a'c'$; ce qui est une nouvelle preuve que les rayons peuvent se croiser au même point sans se modifier, et que chacun d'eux se comporte toujours comme s'il était seul. Enfin, le petit miroir mm' que l'on placera au point r et qui recevra de la lumière blanche comme dans l'expérience précédente, renverra dépendant de la lumière colorée et reproduira un autre spectre renversé $a''t''$.

3°. On adapte au volet de la chambre noire un grand prisme à fente (Fig. 636 bis), qui n'est autre chose qu'un prisme creux en glace, main-

teen contre la plaque de cuivre c' dans laquelle on a ménagé des ouvertures $a, s, c, v,$ etc. Un grand réflecteur renvoie les rayons du soleil sur toute la face c' , et quand il n'y a pas de liquide dans le prisme, chaque ouverture donne seulement une image blanche; mais dès que le prisme est rempli d'eau ou d'un autre liquide, la lumière est décomposée, et il en résulte des spectres $a'', s'', c'',$ etc. A une petite distance ces spectres restent séparés et conservent leurs couleurs distinctes; plus loin ils empiètent les uns sur les autres, leurs couleurs se mêlent au point de former du blanc; plus loin encore la lumière blanche s'affaiblit de plus en plus, à tel point qu'on distingue seulement un seul spectre comme s'il n'y avait qu'une seule ouverture. Dans cette expérience la lumière blanche que l'on obtient résulte évidemment du concours ou de la superposition de toutes les nuances simples, chacun des faisceaux $a'', s'',$ etc., fournissant une nuance différente, l'un le violet, l'autre le bleu, etc., jusqu'au dernier qui donne le rouge.

4°. Il y a enfin un moyen mécanique de recomposer la lumière blanche, dont l'effet semble toujours fort surprenant. Imaginons un cercle en carton (Fig. 636) ayant environ 1 pied de diamètre, percé en son centre d'un petit trou c , et offrant deux zones peintes en noir, l'une z près du centre, l'autre z' près du bord. Dans l'intervalle de ces deux zones on colle de petites bandes de papier $an', e'o', n'v',$ etc. La première d'ann. rouge qui imite autant qu'il est possible le rouge du spectre, la deuxième orangée, la troisième jaune, etc.; quand la période des sept nuances est épuisée on recommence dans le même ordre, pour achever le cercle, avec l'attention que toutes les périodes soient complètes, et que dans chacune d'elles les bandes aient des largeurs à peu près proportionnelles à l'espace que les diverses couleurs occupent dans la longueur du spectre. Lorsqu'un tel carton est mis en mouvement rapide autour de son centre, soit avec la main sur une tige qui passe par l'ouverture centrale, soit par quelque autre moyen, toutes les nuances des bandes colorées disparaissent, et l'intervalle des zones noires z et z' paraît d'un blanc plus ou moins complet. Ce phénomène singulier peut s'expliquer de la manière suivante: s'il n'y avait qu'une seule bande rouge an' sur un fond noir, on verrait par la rotation un cercle rouge, comme dans l'expérience si connue du charbon allumé que l'on tourne en rond avec une grande rapidité; s'il n'y avait qu'une seule bande violette, on verrait par la même raison un cercle violet, puis un cercle vert pour une bande verte, un jaune pour une bande jaune, etc. Or, si toutes ces bandes existent et tournent en même temps, on verra à la fois au même lieu, un cercle rouge, un orangé, un jaune, etc., et par conséquent un cercle blanc, puisque la sensation du blanc n'est que la sensation simultanée de toutes ces nuances.

541. Des couleurs complémentaires et des nuances produites par le mélange de diverses couleurs simples en diverses proportions.

Puisque toutes les couleurs simples, prises ensemble dans leur proportion naturelle (c'est-à-dire, dans la proportion que donne le spectre), reproduisent la lumière blanche, il est évident que, pour altérer la blancheur, il suffit de supprimer l'une des couleurs simples, ou seulement d'en altérer la proportion. Ainsi, en supprimant le rouge dans le spectre, et en composant entre elles toutes les couleurs restantes, on obtient une teinte bleuâtre; cette teinte mêlée au rouge reproduit du blanc. Toutes les fois que deux couleurs simples se composent remplissant cette condition, c'est-à-dire, toutes les fois que, mêlées ensemble, elles reproduisent du blanc, elles sont dites complémentaires l'une de l'autre. Il n'y a pas de couleur, quelle qu'elle soit, qui n'ait sa couleur complémentaire; car, si elle n'est pas blanche, il lui manque seulement quelques-uns des éléments de la lumière blanche, et ces éléments mélangés entre eux forment sa couleur complémentaire. Mais si au mélange de ces éléments on ajoutait du blanc en diverses proportions, on aurait autant de nuances différentes qui seraient toutes également efficaces pour reproduire la couleur blanche avec la couleur donnée. Il y a donc rigoureusement une infinité de nuances différentes qui ont la même couleur complémentaire, et une infinité de nuances complémentaires qui appartiennent à la même couleur donnée. La plupart des verts ont pour couleurs complémentaires des violets plus ou moins rougeâtres, et les jaunes des indigos plus ou moins violacés. Pour étudier, par l'expérience, les teintes qui résultent de plusieurs couleurs simples mélangées, on peut employer l'appareil à sept miroirs représenté dans la figure 630. On le place à une assez grande distance du prisme pour que le spectre soit bien étalé, et l'on incline convenablement les miroirs pour diriger en un même point d'une feuille de papier très blanc, celles des nuances dont on veut observer la composition. Il paraît que Newton a fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet, soit par cette méthode, soit par d'autres analogues, et il est ensuite parvenu à une construction géométrique très remarquable qui représente avec une fidélité étonnante le résultat de toutes ces expériences. Nous pouvons seulement décrire cette construction et en indiquer l'usage; car Newton, après l'avoir vérifiée par l'expérience, ne l'a justifiée par le raisonnement dans aucun de ses ouvrages, et personne jusqu'à présent n'a pu deviner la liaison cachée qu'elle a sans doute avec la théorie.

On divise la circonférence du cercle ROUVATE (Fig. 640) en sept parties qui aient les grandeurs suivantes :

$ao = 60^\circ$	$.. 45'$	$.. 34''$
$os = 34$	$.. 10$	$.. 38$
$sv = 54$	$.. 41$	$.. 1$

$v = 60 \dots 45 \dots 34''$
$st = 54 \dots 4t \dots 1$
$iv = 34 \dots 10 \dots 38$
$vs = 60 \dots 45 \dots 34$

Eu supposant que ces sept arcs représentent les sept couleurs simples, savoir, a le rouge, e l'orangé, etc., leurs centres de gravité r, o, f, v, b, i, w , ainsi que le centre de gravité c de la circonférence entière, sont les forces qu'il faut composer entre elles pour avoir la nuance qui résulte de plusieurs couleurs simples données.

D'abord, si l'on veut savoir la couleur que donne le mélange de toutes les nuances, il faut composer ensemble les sept centres de gravité des sept arcs, comme on compose des forces parallèles; leur résultante passant évidemment par le centre, c'est une preuve que la nuance du mélange est le blanc parfait.

Pour composer, par exemple, le rouge avec une certaine proportion de blanc, il faudra attribuer au centre de gravité c une certaine valeur dépendante de la proportion de blanc que l'on veut mélanger; cette valeur sera égale à la somme des valeurs des centres de gravité, r, o, f , etc., si la proportion de blanc est celle qui résulte du mélange de toutes les nuances; elle en sera la moitié, si l'on ne prend qu'une proportion de blanc moitié, etc.; ensuite, on composera ce centre de gravité avec r , la résultante tombant évidemment sur la ligne rc ; c'est une preuve que la teinte du mélange sera rougeâtre et d'autant plus livrée de blanc, que la résultante tombera plus près du centre c . On agirait de même pour composer avec du blanc l'une quelconque des nuances simples.

En suivant la même règle, il est facile de voir :

1°. Que deux couleurs simples consécutives donnent toujours par leur mélange une nuance intermédiaire. Le rouge et l'orangé donnent un rouge plus voisin de l'orangé, ou un orangé plus voisin du rouge, etc.

Newton cependant recommande de ne pas appliquer cette règle au rouge et au violet qui ne se suivent pas dans le spectre.

2°. Que deux couleurs distantes d'un rang donneront, par leur mélange, la couleur qui les sépare. Ainsi, on a le tableau suivant :

Le rouge et le jaune donnent de l'orangé.
L'orangé et le vert. du jaune.
Le jaune et le bleu. du vert.
Le vert et l'indigo. du bleu.
Le bleu et le violet. de l'indigo.

Mais l'indigo et le rouge donnent une espèce de pourpre qui diffère sensiblement du violet.

3°. Que deux couleurs distantes du deux rangs donnent aussi l'une des nuances qui les séparent, mais que cette nuance est comme si elle était lavée d'une assez grande quantité de blanc.

On peut appliquer aisément le calcul à cette construction empirique, et trouver la nuance qui ré-

sulte du mélange d'un nombre quelconque de couleurs simples prises dans des proportions quelconques.

642. Toute lumière composée éprouve en se réfractant une décomposition et une recomposition.

Si nous maintenons la marche d'un pinceau de lumière blanche qui traverse obliquement une lame à faces parallèles. Soit a a' (Fig. 640), la face supérieure de cette lame, s s' sa face inférieure, et LI la direction du pinceau incident qui sera supposé venir de l'infini. Le rayon LI sera décomposé par la réfraction en une infinité de rayons diversement colorés, depuis le rouge extrême qui prendra la direction $1a$, jusqu'au violet extrême qui prendra la direction $1v$; et la loi de Descartes (625) s'appliquant aux premiers comme aux derniers, chacun d'eux produit un rayon émergent parallèle à LI , ce qui donne en somme un petit pinceau parallèle dont les rayons depuis a a' et s s' présentent toutes les nuances du spectre. Ce résultat semble d'abord contraire à l'expérience, car on sait que la lumière blanche n'est pas décomposée en traversant les lames parallèles, quelle que soit leur nature. Mais il suffit de considérer l'ensemble des rayons voisins du rayon LI , pour se rendre compte de cette contradiction apparente. En effet, LI' , par exemple, donne comme LI dans l'intérieur de la lame un pinceau dilaté qui présente toutes les nuances du spectre, et à l'extérieur, un pinceau parallèle a' s' , v s' , en tout pareil à a k , o k . De plus, chacun des rayons du second est parallèle à son homologue dans le premier; il en serait de même de tous les rayons compris entre LI et LI' , et c'est là précisément ce qui explique la blancheur du faisceau émergent. Car il y a près de LI un rayon incident, qui donne un rayon orangé suivant ax ; un peu plus loin, il y en a un autre qui donne un rayon jaune suivant la même ligne, un autre qui en donne un vert, un autre un bleu, etc.; d'où il résulte enfin que tous les rayons émergents sont des rayons blancs, excepté toutefois ceux qui se trouvent aux bords du pinceau en ax et o k ; mais ceux-ci sont en général modifiés par la diffraction, et il n'est pas possible d'y reconnaître les nuances que la simple décomposition leur donne.

On voit en même temps que la décomposition subsiste dans l'intérieur même de la lame, et l'œil qui serait placé quelque part dans son épaisseur, recevant les rayons rouges dans une direction, et les violets dans une autre, verrait en des points différens, le rouge, le violet et les nuances intermédiaires, c'est-à-dire, qu'il distinguerait un spectre au lieu d'une image blanche. Cependant, les corps éclairés par ces divers rayons seraient comme s'ils étaient éclairés par des rayons blancs, parce que les rayons qui concourent en un point d'un corps opaque, en suivant des directions peu différentes, produisent le même effet que s'ils arrivaient en ce point dans la même direction.

L'analyse précédente nous fait voir que c'est aux surfaces des corps réfringens que s'accomplissent à la fois les réfractions, les décompositions et les recompositions de la lumière. Nous pourrions citer un grand nombre d'exemples de ces phénomènes, mais nous nous bornerons à indiquer encore deux expériences qui montrent d'une manière assez curieuse le jeu de ces décompositions et recompositions successives.

1°. Lorsqu'on fait tomber un petit pinceau de lumière solaire sur un prisme équilatéral ABC (Fig. 641), dans une direction convenable LI , et au tiers à peu près de son côté, on observe six images autour du prisme; chaque face en donne deux, l'une blanche, et l'autre colorée formant un spectre complet. En suivant sur la figure le marche de la lumière, on pourra facilement se rendre compte de ce phénomène: on verra qu'à la deuxième incidence, i_2 , le rayon violet v tombe plus obliquement que le rayon rouge r , doit sortir aussi plus obliquement; c'est pourquoi, ces rayons et les rayons intermédiaires formeront un premier spectre s_1 ; à la troisième incidence i_3 , qui résulte de la réflexion en i_2 , le rayon violet v tombe moins obliquement que le rayon rouge r ; ils sont l'un et l'autre comme s'ils venaient d'un point t' , après être entrés par une face ac' parallèle à ac ; ainsi, ils doivent sortir parallèlement et donner une première image blanche s_1 ; à la quatrième incidence i_4 , ils donnent un deuxième spectre s_2 ; à la cinquième incidence i_5 , une deuxième image blanche s_2 , etc., etc.

2°. On forme une image du soleil au foyer d'une lentille au moyen d'un large faisceau de lumière directe (Fig. 642), ensuite on présente un carton blanc successivement au foyer, puis à une moindre, puis à une plus grande distance de la lentille. Au foyer en c , l'image est complètement blanche, plus près de la lentille en c' , elle est blanche au centre et entourée vers ses bords d'une auréole rouge et jaune; plus loin en c'' , elle est encore blanche au milieu, mais vers ses bords elle est entourée d'une auréole bleue et violette.

Ce premier résultat est facile à expliquer; chaque rayon incident est décomposé par la lentille comme il le serait par un prisme; il en résulte par conséquent un nombre infini de spectres dont la superposition est tantôt complète, tantôt imparfaite. Le rouge, comme moins réfrangible, va faire son foyer plus loin en a , tandis que le violet fait son foyer en v ; ainsi, quand le tableau est en c' , on a une image blanche ac' avec une auréole av , av' dont le rouge est en dehors. Quand il est en c'' , on a une image blanche ac'' avec une auréole violette av , av' ; enfin, quand il est en c , ou a une image ac complètement blanche, parce que les rayons violets qui se sont croisés en v viennent tomber au même point que les rayons rouges qui vont se croiser en a . Mais le célèbre professeur Charles avait coutume, dans ses leçons, de rendre l'expérience plus pi-

quante par l'artifice suivant: on découpe dans une carte (Fig. 643), un petit anneau dans l'intérieur duquel il reste un cercle plein, d'un diamètre un peu plus grand que aa' (Fig. 642). Cette carte, placée en s , arrête toute la lumière, et le tableau plus ou moins éloigné ne reçoit aucune image, ensuite on met graduellement la carte soit pour l'approcher, soit pour l'éloigner de la lentille, et en la tenant toujours de manière que le centre de l'anneau découpé coïncide avec l'axe du faisceau; alors, dans le premier cas, on voit paraître sur le tableau une large auréole de lumière rouge très vive, puis une autre auréole jaunâtre, et enfin, une auréole blanche; et, dans le second cas, les auréoles qui se succèdent sont violettes, blanches en blanches, et toujours très éclatantes.

543. *Les couleurs naturelles des corps sont en général des couleurs composées.*

Le prisme qui vient de nous servir à décomposer la lumière solaire, peut être employé avec le même succès pour analyser les diverses couleurs naturelles des corps. Les phénomènes qui se présentent alors sont très variés, mais il nous suffira d'indiquer les conditions sous lesquelles ils se produisent, et le principe qui sert à les expliquer.

1°. Au milieu d'une feuille de papier noir, on pose à la suite l'une de l'autre deux petites bandes de papier a et v , l'une rouge et l'autre violette, de 1 ou 2 centimètres de longueur et de 1 millimètre de diamètre (Fig. 637); puis on les regarde avec un prisme à quelques pieds de distance en tenant les arêtes du prisme parallèles à la longueur des bandes. On aperçoit alors une image déviée de chaque bande, l'image violette v est bien plus relevée vers le sommet du prisme que n'est l'image rouge r . Ainsi, le violet est plus réfrangible que le rouge, et c'est par l'inégale réfrangibilité que l'on voit au travers du prisme les deux bandes séparées, tandis qu'en les voit unies et sur la même ligne lorsqu'on les regarde directement.

2°. Si au lieu de peindre l'une des bandes en rouge et l'autre en violet, en mélange d'abord les deux couleurs ensemble, pour peindre une seule bande r avec la couleur composée, qui est une espèce de pourpre; alors, au travers du prisme, cette bande r donne à elle seule deux images distinctes et séparées r et v , l'une rouge et l'autre violette. Ainsi, la puissance réfringente du prisme sépare les deux couleurs élémentaires qui composent le pourpre, et dévie chacune de ces couleurs suivant les lois qui lui sont propres; exactement comme si elles provenaient d'un corps lumineux par lui-même.

3°. Les corps qui sont naturellement blancs, comme la neige, les fleurs, le papier, etc., ne pouvant tirer leur blancheur que de la lumière qui les éclaire, on peut juger d'avance que leur couleur doit reproduire toutes les nuances du spectre; comme le pourpre de l'expérience précédente a re-

produit les nuances élémentaires de rouge et de violet qui entraient dans sa composition.

En effet, une petite bande b de papier blanc (Fig. 637) éclairée par la lumière des nuées et regardée avec le prisme, ne donne plus aucune trace de couleur blanche dans son image u ; mais si elle est assez étroite, elle donne, d'une manière parfaitement distincte, le rouge, l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo et le violet, dans le même ordre et avec les mêmes proportions que la lumière solaire. Si cette même bande b était éclairée avec la flamme d'une bougie, elle reproduirait les teintes de la flamme ; le jaune s'y trouverait en plus grande proportion.

4°. Une large bande de papier, blanc s (Fig. 637) présente d'autres apparences : l'image de la lumière rouge qu'elle envoie se trouvant déviée en r et r' , celle de la lumière violette en u et u' , et les couleurs intermédiaires dans des positions intermédiaires, il arrive que dans l'intervalle u et u' toutes les couleurs simples se trouvent superposées et reproduisent du blanc ; mais en même temps la recomposition est incomplète vers les bords, et l'on aperçoit entre u et r' des bandes violettes, indigos, bleues, et entre r et u des bandes rouges, orangées, jaunes. Le vert ne paraît jamais, ni dans les bandes supérieures, ni dans les bandes inférieures, parce que dans les premières, les couleurs qui manquent pour former du blanc sont successivement : le rouge, le rouge et l'orangé ; le rouge, l'orangé et le jaune, etc. ; qui ont pour couleurs complémentaires le bleu et les nuances qui s'approchent du violet. Tandis que, dans les bandes inférieures, les couleurs qui manquent sont successivement : le violet, le violet et l'indigo, etc., qui ont pour couleurs complémentaires le jaune et les nuances qui s'approchent de l'orangé et du rouge.

5°. Une large bande noire n (Fig. 637) sur un fond blanc, présente, au travers du prisme, des phénomènes qui sont précisément l'inverse des précédents ; le milieu u et r de l'image u est noir, et, à partir de ce milieu, les bandes colorées sont successivement rouges, orangées, jaunes, vers le haut ; et violettes, indigos bleues, vers le bas. Pour se rendre compte de cette inversion, il suffit de remarquer que les couleurs résultent de l'espace blanc qui limite la bande noire n ; celles d'en haut proviennent du fond blanc qui est immédiatement au-dessus de n , et celles d'en bas proviennent du fond blanc qui est immédiatement au-dessous.

6°. Une bande noire n très étroite (Fig. 637) ne donne plus de noir au milieu ; son image se compose simplement de bandes rouges et violettes,

au dehors desquelles se trouve, d'un côté, l'orange et le jaune, et de l'autre, l'indigo et le bleu. C'est comme si le milieu noir de l'expérience précédente diminuait de plus en plus au point de disparaître.

7°. Les résultats que nous venons d'obtenir avec des bandes rouges, violettes, pourpres, blanches et noires, indiquent d'une manière suffisante ceux que l'on obtiendrait en regardant avec un prisme des taches d'une forme et d'une couleur quelconque, sur un fond qui aurait aussi une couleur donnée ; et l'on conçoit combien il est facile d'analyser, par ce moyen, les couleurs naturelles de tous les corps. On peut ainsi passer en revue toutes les couleurs des substances minérales, végétales et animales, et constater que, parmi toutes ces substances, il n'en est pas une qui donne de la lumière simple. Par exemple, les pétales des fleurs dont les couleurs sont les plus éclatantes et les mieux tranchées, donnent toujours des nuances diverses lorsqu'on les dispose sur un fond même très noir pour les regarder avec un prisme.

La lumière que nous pouvons produire artificiellement, soit par la combustion, soit, en général, par les forces chimiques, soit par les actions physiques ou mécaniques, peut être analysée par le même moyen, et toutes les expériences qui ont été faites sur ce sujet, conduisent jusqu'à présent aux deux conséquences suivantes :

1°. La lumière artificielle, quelle que soit son origine, ne contient aucune nuance simple qui ne se retrouve dans la lumière solaire.

2°. Il n'existe aucune lumière artificielle qui reproduise les nuances simples de la lumière solaire avec leurs intensités et leurs proportions relatives. La nuance qui domine dans une lumière artificielle est aussi la nuance qui domine dans le spectre que l'on obtient en la regardant avec un prisme. Ainsi, les flammes rouges, jaunes, vertes ou bleues, donnent des spectres où la couleur dominante est le rouge, le jaune, le vert ou le bleu. Quelques observateurs avaient pensé que le jaune de la flamme du soufre en combustion est un jaune simple, et qu'il en est de même du jaune que l'on obtient en brûlant avec une mèche en éponge de l'alcool très étendu (BAKSTON, *Edinburg Transact.*, vol. 9). Mais les expériences plus précises de Fraunhofer, dont nous parlerons dans le chapitre suivant, font découvrir encore plusieurs nuances simples dans ces couleurs artificielles ; et en même temps elles donnent le moyen d'établir des caractères distinctifs indépendants de la couleur, soit entre les diverses lumières que nous pouvons produire, soit entre la lumière du soleil et celles des étoiles.

CHAPITRE IV.

DES RAIES DU SPECTRE, DE LA DISPERSION ET DE L'ACHROMATISME.

544. *Des raies du spectre.* — Nous appellerons raies du spectre les changements brusques d'intensité que Fraunhofer a découverts dans la lumière du spectre. Ces changements se présentent tantôt sous l'apparence de lignes noires ou presque complètement noires, tantôt sous l'apparence de lignes brillantes.

Les figures 652 et 653 représentent ce phénomène singulier, pour la lumière solaire; la fig. 653 est le spectre ordinaire, où sont marqués les espaces occupés par les diverses couleurs, et la fig. 652 offre les principales raies que l'on y distingue; elles sont toujours noires, et en concevant que cette figure soit projetée sur la première, on aura une idée des positions de ces diverses raies par rapport aux nuances du spectre. On voit d'abord qu'elles ne tombent pas aux limites des couleurs, mais qu'elles se trouvent réparties depuis le rouge au violet avec une grande irrégularité, sans rien offrir de remarquable au passage du rouge à l'orangé, de l'orangé au jaune, etc. On peut remarquer ensuite qu'il n'y a pas moins d'irrégularité dans leur apparence que dans leur position; les unes sont très déliées et ne paraissent que comme des lignes noires isolées et à peine visibles; d'autres sont très rapprochées et ressemblent plutôt à une ombre qu'à un assemblage de lignes distinctes; enfin, il y en a quelques-unes qui sont très tranchées et paraissent avoir une étendue sensible. Pour établir quelques points de repères au milieu de cette confusion, Fraunhofer a choisi les sept raies qui sont marquées a , c , b , x , f , g , h , comme offrant le double avantage d'être faciles à reconnaître et de partager le spectre en espaces qui ne sont pas trop inégaux. De a à c on compte 9 raies fines et bien déterminées; de c à b on en compte 30; de b à x , environ 84 de différentes grosseurs; de x à f , plus de 78, entre lesquelles on en distingue trois des plus fortes du spectre et des mieux terminées; de f à g , 185, et de g à h 190; ce qui fait 574 de a à h . Si l'on compte encore celles qui sortent de ces limites, on peut évaluer à 6 ou à 700 le nombre total des raies noires, ou plus ou moins sombres que présente le spectre solaire dans toute sa longueur.

Pour observer ce phénomène, il ne suffit pas de jeter les yeux sur le tableau qui reçoit le faisceau de lumière décomposé par le prisme; ces espaces noirs sont beaucoup trop fins et trop resserrés pour être aperçus directement; mais il est nécessaire d'employer un appareil particulier, et surtout un

grossissement considérable. On peut disposer l'expérience de la manière suivante: on fait entrer dans la chambre noire un pinceau de lumière solaire par une ouverture longue et étroite. A la distance de 6 ou 7 mètres on reçoit ce faisceau sur un prisme très pur sans stries ni filandres, et tourné de manière que ses arêtes soient parallèles à la longueur de l'ouverture; derrière ce prisme on dispose une lunette achromatique, pour qu'elle reçoive le faisceau réfracté et décomposé; et c'est en regardant dans la lunette, successivement toutes les nuances du spectre, que l'on distingue les raies qui appartiennent aux diverses portions de sa longueur.

Après avoir fait cette découverte importante, Fraunhofer a constaté 1° que les raies sont toutes faites indépendantes de l'angle réfringent du prisme, et 2° qu'elles sont pareillement indépendantes de la nature de la substance réfringente, c'est-à-dire que, dans tous les cas, elles restent les mêmes pour leur nombre, leur forme et leur disposition.

Jusqu'à présent on a trouvé une identité si absolue entre la lumière du soleil et toutes les autres lumières naturelles ou artificielles, qu'il était très important de chercher si cette identité se soutiendrait encore à la nouvelle épreuve des raies du spectre. C'est dans cette vue que Fraunhofer a fait avec le même appareil diverses expériences sur l'étincelle électrique, sur la flamme d'une lampe, sur la lumière de Vénus et sur celle de Sirius.

La lumière électrique donne des raies brillantes, au lieu de raies noires; l'une des plus remarquables par sa vive intensité se trouve dans le vert.

La lumière d'une lampe donne pareillement des raies brillantes; on peut surtout en distinguer deux très intenses vers le rouge et l'orangé. La flamme de l'hydrogène et celle de l'alcool présentent sous ce rapport la même apparence que les flammes d'huile.

La lumière de Vénus donne les mêmes raies que la lumière du soleil; seulement elles sont moins faciles à distinguer vers les extrémités du spectre.

Enfin, la lumière de Sirius donne aussi des raies noires; mais elles sont tout-à-fait différentes de celles du soleil ou des planètes. Il y en a trois surtout qui sont très remarquables: l'une dans le vert, et deux dans le bleu.

D'autres étoiles de première grandeur paraissent

donner des raies différentes de celles de Sirius et de celles du soleil.

Ainsi, par cette nouvelle donnée et par ces observations précises, se trouvent établis des caractères distinctifs entre les diverses lumières naturelles ou artificielles; c'est une vaste carrière ouverte par l'habile artiste de Munich dont nous avons à déplorer la perte. Nous pouvons espérer que les physiciens suivront avec un vif intérêt ces premières découvertes qui tiennent de si près à l'origine de la lumière et aux conditions sous lesquelles elle prend naissance, soit artificiellement dans les corps terrestres, soit naturellement dans le soleil et les étoiles.

546. *Des indices de réfraction pour divers rayons du spectre.*

La recherche des indices de réfraction des divers rayons de lumière est un problème d'une grande importance pour la théorie de l'optique et pour la construction des instruments. L'invariabilité des raies du spectre offre, pour le résoudre, un moyen beaucoup plus exact que ceux qu'on pouvait em-

ployer quand on n'avait, pour points de repères, que des nuances de couleurs toujours incertaines. Ainsi, au lieu de déterminer pour chaque substance l'indice de réfraction du rouge, de l'orangé, du jaune, etc., on cherche les indices de réfraction des raies que nous avons précédemment appelées λ , μ , ν , ξ , η , θ , π (Fig. 652). Les expériences se réduisent toujours à observer l'angle d'incidence sur le prisme, l'angle d'émergence et la déviation : mais on peut aussi simplifier cette recherche en plaçant le prisme comme nous l'avons indiqué (539), de manière qu'il donne successivement pour chaque rayon la déviation *minimum*; alors cette déviation est la seule donnée dont on ait besoin. La lunette qui reçoit le spectre au sortir du prisme est munie d'un fil micrométrique parallèle aux raies, qui permet de remplir la condition du *minimum* avec le dernier degré d'exactitude. Voici le tableau de quelques expériences très exactes faites par Fraunhofer. Nous avons désigné par λ , μ , ν , ξ , η , θ , π , les indices de réfractions correspondants aux raies λ , μ , ν , ξ , η , θ , π .

Tableau des indices de réfraction des divers rayons du spectre.

SUBSTANCES SÉRIEMENTAL.	λ	μ	ν	ξ	η	θ	π
Flintglass No 13. . .	1,627749	1,629681	1,635036	1,642024	1,648260	1,660285	1,671062
Crown glass No 9. . .	1,525832	1,526849	1,529587	1,533005	1,536052	1,541657	1,546566
Eau.	1,330935	1,331712	1,333577	1,335851	1,337818	1,341293	1,344177
Eau.	1,330977	1,331709	1,333577	1,335849	1,337788	1,341261	1,344162
Potasse.	1,599629	1,400515	1,402805	1,405632	1,408082	1,412579	1,416368
Huile de térébenthine.	1,470496	1,471530	1,474434	1,478353	1,481736	1,488198	1,495874
Flintglass No 3. . .	1,602042	1,603800	1,608494	1,614552	1,620042	1,630772	1,640375
Flintglass No 50. . .	1,625570	1,625477	1,630585	1,637356	1,643466	1,655406	1,666072
Crown glass No 13. . .	1,524512	1,525299	1,527982	1,531372	1,534337	1,539908	1,544684
Crown glass Litt. M. .	1,554774	1,555933	1,559075	1,563150	1,566741	1,573535	1,579479
Flintglass No 25 et Prisme de 60°. . .	1,626596	1,628469	1,633667	1,640495	1,646756	1,658848	1,669686
Flintglass No 23 et Prisme de 45°. . .	1,626564	1,628451	1,633666	1,640544	1,646780	1,658849	1,669680

546. *De la dispersion, des rapports de dispersion dans plusieurs substances et des pouvoirs dispersifs.*

En observant avec attention les spectres formés

par des prismes de diverses substances, on reconnaît bientôt que les diverses couleurs, quoique rangées toujours dans le même ordre, n'occupent pas cependant des longueurs proportionnelles. Ainsi, un

prisme de flint, par exemple, donne proportionnellement moins de rouge et plus de violet qu'un prisme de crown, et il y a d'autres substances qui offrent des différences encore plus frappantes. En général, la même couleur est tantôt plus ou moins resserrée, tantôt plus ou moins développée. Ce phénomène se trouve évidemment lié avec les grandeurs des indices de réfraction correspondants à chaque couleur. Si l'on prend la différence de ces indices, pour le violet et le rouge, on aura ce que l'on appelle la *dispersion* de la lumière. Une substance est d'autant plus dispersive que pour elle cette différence est plus grande. Ainsi l'on voit, d'après le tableau précédent, que la dispersion de la lumière comprise entre la première et la septième raie se trouve exprimée par les nombres suivants :

Flint N° 13.	0,043313
Crown N° 9.	0,020734
Eau.	0,013242
Eau.	0,013185
Potasse.	0,016739
Térébenthine.	0,023378
Flint N° 3.	0,038331
Flint N° 30.	0,042502
Crown N° 13.	0,020372
Crown Litt. M.	0,024606
Flint N° 23, prisme 60°. . .	0,043090
Flint N° 23, prisme 45°. .	0,043116

L'eau est donc, parmi ces substances, celle qui a la moindre dispersion, et le flint celle qui a la plus grande. C'est ce que l'on peut aisément montrer aux yeux en prenant un prisme d'eau et un prisme de flint dont les angles soient tels, par exemple, que les rayons rouges éprouvent à peu près la même déviation; car on pourra voir alors qu'à la même distance le premier spectre aura beaucoup moins de longueur que le second, ce que l'on peut exprimer encore en disant que, vu du prisme, il serait vu sous angle beaucoup plus petit.

Il n'est pas seulement nécessaire de connaître la dispersion totale de chaque substance, mais il importe encore de connaître la dispersion qu'elle exerce sur les divers rayons. Ainsi, pour les rayons compris entre la première et la deuxième raie, les dispersions du flint n° 13, du crown n° 9, et de l'eau sont respectivement 0,001032, 0,001017, 0,000777, car ces dispersions sont les différences des indices de réfraction correspondants aux limites de l'intervalle, c'est-à-dire, à la première et à la seconde raie.

Lorsqu'on divise la dispersion partielle ou totale d'une substance par la dispersion correspondante d'une autre substance, on a le *rapport des dispersions*. C'est ainsi que le tableau suivant a été déduit du tableau précédent (page 382). On a accentué au sommet de chaque colonne les indices de réfraction correspondants à la substance la moins dispersive.

Tableau de dispersion partielle de plusieurs substances prises deux à deux.

SUBSTANCES naturelles.	$N_2 - N_1$	$N_3 - N_2$	$N_4 - N_3$	$N_5 - N_4$	$N_6 - N_5$	$N_7 - N_6$
	$N'_2 - N'_1$	$N'_3 - N'_2$	$N'_4 - N'_3$	$N'_5 - N'_4$	$N'_6 - N'_5$	$N'_7 - N'_6$
Flintglas N° 13 et Eau.	1,562	1,871	3,073	3,193	3,480	3,728
Flintglas N° 13 et Crownglas N° 9.	1,900	1,956	2,044	2,047	2,145	2,195
Crownglas N° 9 et Eau.	1,349	1,488	1,503	1,580	1,615	1,897
Huile de térébenthine et Eau.	1,371	1,557	1,723	1,732	1,880	1,963
Flintglas N° 13 et Huile de térébenth.	1,888	1,844	1,783	1,843	1,881	1,899
Flintglas N° 13 et Kali.	2,181	2,368	2,472	2,545	2,874	2,844
Kali et Eau.	1,175	1,228	1,243	1,254	1,294	1,310
Huile de térébenthine et Kali.	1,187	1,258	1,306	1,381	1,457	1,498
Flintglas N° 3 et Crownglas N° 9.	1,729	1,714	1,767	1,808	1,914	1,958
Crownglas N° 13 et Eau.	1,309	1,438	1,492	1,518	1,804	1,851
Crownglas Litt. M. et Eau.	1,537	1,682	1,794	1,839	1,956	2,052
Crowngl. Litt. M. et Crowngl. N° 13.	1,174	1,171	1,202	1,211	1,220	1,243
Flintglas N° 13 et Crowngl. Litt. M.	1,667	1,704	1,715	1,737	1,770	1,816
Flintglas N° 3 et Crownglas Litt. M.	1,517	1,494	1,482	1,534	1,579	1,618
Flintglas N° 30 et Crownglas N° 13.	1,932	1,904	1,997	2,081	2,143	2,233
Flintglas N° 23 et Crownglas N° 13.	1,904	1,940	2,022	2,107	2,188	2,288

On voit par ce tableau que les rapports des dispersions partielles des diverses substances sont en général très différents, et qu'en général ils vont en croissant depuis les intervalles des premières raies jusqu'aux intervalles des dernières. Cependant pour le flint n° 13 et la térébenthine les rapports sont à très peu près les mêmes dans toute la longueur du spectre, et pour le flint n° 3 et le crown litt. M, le rapport minimum se trouve compris entre la troisième et la quatrième raie. Il serait très important de vérifier par l'expérience ce que ces derniers résultats semblent offrir de général.

Le pouvoir dispersif d'une substance est le quotient que l'on obtient en divisant sa dispersion par son indice moyen de réfraction diminué de l'unité. On appelle indice moyen de réfraction celui qui appartient à la lumière moyenne du spectre. Nous empruntons à l'encyclopédie de M. Brewster, le

tableau suivant, qui contient les pouvoirs dispersifs et les dispersions de plusieurs substances; les nombres dont il se compose inspireraient, sans doute, plus de confiance s'ils avaient été obtenus en prenant pour points de repères les raies du Fraunhofer, mais il est antérieur à cette découverte; les dispersions y sont encore exprimées par les différences des indices de réfraction du violet extrême et du rouge extrême, et ces différences ont été divisées par les indices de réfraction du jaune verdâtre pour en former les pouvoirs dispersifs. Or, on ne peut déterminer sans incertitude, ni les limites extrêmes du spectre, ni le rayon que l'on convient de prendre pour rayon moyen dans toutes les expériences. Cependant, comme ce tableau a été dressé par les soins de M. Brewster, et d'après ses propres expériences, on peut compter que l'habileté de l'observateur a suppléé autant qu'il était possible à l'imperfection du procédé.

Tableau des dispersions et des pouvoirs dispersifs de plusieurs substances.

NOMS DES SUBSTANCES.	dispersion ou $N_e - N_r$	dispersion ou $N_e - N_r$	NOMS DES SUBSTANCES.	dispersion ou $N_e - N_r$	dispersion ou $N_e - N_r$
	$N_e - N_r$	$N_e - N_r$		$N_e - N_r$	$N_e - N_r$
Chromate de plomb, maximum estimé à	0,400	0,770	Écaille de tortue	0,045	0,027
Chromate de plomb, id. doit ex- céder.	0,386	0,570	Corne	0,045	0,025
Résalgar fondu.	0,367	0,394	Baume du Canada.	0,045	0,014
Chromate de plomb, minimum.	0,362	0,388	Huile de marjolaine.	0,045	0,029
Résalgar fondu.	0,355	0,374	Gomme oliban.	0,045	0,034
Huile de cassia.	0,139	0,089	Acide nitreux.	0,044	0,018
Soufre après la fusion.	0,120	0,149	Huile de caprout.	0,044	0,021
Phosphore.	0,116	0,156	Huile d'hysop.	0,044	0,022
Sulfure de carbone.	0,115	0,077	Huile de bois de Rhodes.	0,044	0,022
Baume de tolu.	0,103	0,065	Verre rose.	0,044	0,025
Baume du Pérou.	0,093	0,058	Huile de sésame.	0,044	0,021
Carbonate de plomb, maxim.	+0,091	+0,091	Huile de pavot.	0,044	0,020
Alcool des Barbades.	0,085	0,058	Zircon, maximum.	0,044	0,045
Huile d'amarandes amères.	0,079	0,048	Acide muriatique.	0,043	0,016
Huile d'anis.	0,077	0,045	Copal	0,043	0,024
Acétate de plomb fondu.	0,069	0,040	Huile de noix.	0,043	0,022
Baume styrac.	0,067	0,039	Pois de Bourgogne.	0,043	0,024
Gayac.	0,066	0,041	Huile de térébenthine.	0,043	0,020
Carbonate de plomb, minimum.	0,066	0,036	Huile de romarin.	0,042	0,020
Huile de eumin.	0,065	0,035	Feldspath.	0,042	0,022
Huile essentielle de tabac.	0,063	0,035	Glace.	0,041	0,022
Gomme ammoniacque.	0,063	0,037	Baume de copahu.	0,041	0,021
Huile de goudron des Barbades.	0,063	0,032	Ambre.	0,041	0,023
Huile de girofle.	0,062	0,033	Huile de muscades.	0,041	0,021
Verre vert.	0,061	0,037	Stilbide.	0,041	0,021
Sulfate de plomb.	0,060	0,036	Huile de menthe poivrée.	0,040	0,019
Verre rouge foncé.	0,060	0,034	Rubis spinelle.	0,040	0,031
Huile de sassafras.	0,060	0,032	Spath calcaire, maximum.	0,040	0,027
Hydrochlorate d'antimoine.	0,059	0,036	Huile de colza.	0,040	0,019
Verre opale.	0,060	0,038	Verre de bouteilles et de soude.	0,040	0,023
Résine.	0,057	0,032	Tartrate de potasse et de soude.	0,039	0,020
Huile de fenouil.	0,055	0,028	Gomme étié.	0,039	0,021
Huile de mentha sauvage.	0,054	0,026	Sulfate de fer.	0,039	0,019
Verre orange.	0,053	0,019	Diamant.	0,038	0,016
Sel gomme.	0,053	0,029	Huile d'olives.	0,038	0,018
Caoutchouc.	0,052	0,018	Gomme mastic.	0,036	0,022
Huile de piment.	0,052	0,026	Blanc d'œuf.	0,037	0,013
Flintglas.	0,052	0,022	Huile de rhue.	0,037	0,016
Verre pourpre foncé.	0,051	0,021	Gomme myrrhe.	0,037	0,020
Huile d'angelique.	0,051	0,025	Béril.	0,037	0,022
Huile de thym.	0,050	0,024	Obsidienne.	0,037	0,018
Huile de fenugrec.	0,050	0,024	Éther.	0,037	0,012
Huile d'absinthe.	0,049	0,022	Sélénite.	0,037	0,020
Huile de poutiot.	0,049	0,024	Alun.	0,036	0,017
Huile de carvi.	0,049	0,024	Huile de ricin.	0,036	0,018
Huile de dill ?	0,049	0,023	Sulfate de cuivre.	0,036	0,019
Huile de bergamote.	0,049	0,023	Crown très vert.	0,036	0,020
Flintglas.	0,048	0,029	Gomme arabique.	0,036	0,016
Térébenthine de Chio.	0,048	0,028	Sucre après la fusion et refroidi.	0,036	0,020
Encens.	0,048	0,028	Colle de poisson.	0,035	0,013
Huile de limon.	0,046	0,025	Eau.	0,035	0,019
Flintglas.	0,046	0,025	Humeur aqueuse de l'œil d'un poisson.	0,035	0,012
Huile de genévre.	0,047	0,022	Humeur vitrée du même.	0,035	0,012
Huile de camomille.	0,046	0,021	Acide citrique.	0,035	0,019
Gomme de genévre.	0,046	0,025	Rubellite.	0,035	0,027
Carbonate de strontiane, mori.	0,046	0,022	Leucite.	0,035	0,018
Huile de brick (oil of brick).	0,046	0,021	Epidote.	0,035	0,024
Acide nitrique.	0,045	0,019	Verre de borax.	0,034	0,018
Huile de lavande.	0,045	0,021	Grenat.	0,033	0,027
Baume de soufre.	0,045	0,023	Pyrope.	0,033	0,028
			Chrysolite.	0,033	0,022

NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIR dispersif ou $N - N_v$	DISPERSION ou $N - N_r$
	$N_v - N_r$	
Crown.	0,053	0,018
Huile d'ambre gris.	0,052	0,017
Huile de vio.	0,052	0,017
Acide phosphorique solide.	0,052	0,017
Verre de phosphore.	0,05157	0,017
Verre à vitres.	0,052	0,017
Acide sulfurique.	0,051	0,014
Acide tartrique.	0,050	0,016
Nitre, minimum.	0,05040	0,019
Borax.	0,050	0,014
Azinite.	0,050	0,022
Alcool.	0,049	0,012
Sulfate de baryte.	0,049	0,011
Tourmaline.	0,048	0,019
Acide phosphorique liquide.	0,0485	0,019
Carbonate de baryte, minimum.	0,047	0,015
Carbonate de strontiane, mini.	0,046	0,014
Cristal de roche.	0,046	0,014
Émeraude.	0,046	0,015
Verre de borax.	0,046	0,014
Spath calcaire, minimum.	0,046	0,016
Saphir bleu.	0,046	0,022
Topase bleue de Casingorm.	0,045	0,016
Chrysoberil.	0,045	0,019
Topase bleue d'Aberdeenshire.	0,044	0,016
Sulfate de strontiane.	0,044	0,015
Acide prussique.	0,0437	0,020
Acide malique.	0,0432	0,011
Spath fluor.	0,042	0,010
Cryolite.	0,042	0,007

Un des résultats les plus remarquables que présente ce tableau est la différence des pouvoirs dispersifs pour les faisceaux ordinaires et extraordinaires, dans les substances douées de la double réfraction, comme le chlorate de plomb, le carbonate de chaux, le cristal de roche, etc.

547. De l'achromatisme. — On dit que des prismes sont *achromatiques* quand ils ont la propriété de dévier la lumière sans y développer de couleurs, et l'on dit pareillement que des lentilles sont *achromatiques* quand elles forment en leurs foyers des images incolores des objets. On a cru pendant long-temps que l'achromatisme était impossible, c'est-à-dire, que la lumière ne pouvait pas être déviée sans être décomposée : c'est Newton lui-même qui avait été conduit à cette conséquence, dont l'inexactitude ne fut constatée qu'après bien des années, et par de longs débats entre les plus grands géomètres, tels que Euler, Clairaut et d'Alembert. A la vérité, Hall avait construit dès 1733 de véritables lunettes achromatiques qu'il conservait sans publier son invention, et Jean Dollond avait fait la même découverte en 1757, et l'avait rendue publique; mais il faut toujours distinguer un fait particulier d'une théorie générale. La découverte de Dollond fut sans doute un grand

événement pour l'astronomie; mais pour lui donner toute son importance il falloit la développer par le calcul et déterminer les conditions sans lesquelles la pratique la plus ingénieuse ne pouvait tenter les perfectionnements nécessaires. Présentement, après tous les progrès que l'on a faits, soit en optique, soit dans l'art de travailler les verres, et avec toutes les ressources que le calcul fournit aux physiciens, la question de l'achromatisme est encore l'une des plus délicates et des plus embarrassantes, tant pour la théorie que pour la pratique. Nous devons seulement nous proposer ici de faire comprendre les principes sur lesquels repose la construction des prismes et des lentilles achromatiques.

On démontre par le calcul qu'un rayon de lumière simple, éprouve en traversant un nombre quelconque de prismes, une déviation v qui est exprimée par la formule suivante :

$$v = (n-1) \alpha + (n'-1) \alpha' + (n''-1) \alpha'', \text{ etc.}$$

α , α' , α'' , etc., sont les angles réfringents des prismes, et n , n' , n'' , les indices de réfraction du rayon simple dont il s'agit, dans la substance de chacun des prismes α , α' , etc.

Si les angles réfringents de tous les prismes sont tournés dans le même sens, tous les termes doivent être pris avec le même signe, comme ils sont écrits dans la formule.

Si quelques-uns des prismes ont leurs angles réfringents tournés en sens contraire, les termes correspondus de la formule doivent être pris avec le signe moins.

Ainsi, pour le cas de deux prismes, qui est le seul que nous ayons besoin de discuter ici, on aura, suivant que les angles seront tournés dans le même sens ou en sens opposé,

$$v = (n-1) \alpha + (n'-1) \alpha'; \text{ Fig. 644.}$$

$$\text{ou } v = (n-1) \alpha - (n'-1) \alpha'; \text{ Fig. 645.}$$

Au moyen de cette dernière formule, on peut facilement déterminer quel doit être le rapport des angles réfringents de deux prismes dont la substance est connue, pour que leur ensemble n'imprime aucune déviation à un rayon d'une réfrangibilité donnée. Car, la déviation étant nulle, on a

$$(n-1) \alpha = (n'-1) \alpha'$$

$$\text{d'où } \dots \dots \alpha = \alpha' \left(\frac{n'-1}{n-1} \right)$$

Supposons, par exemple, que la substance du prisme α soit du crown n° 9 (tableau de la p. 382), et le prisme α' du flint n° 13; l'indice de réfraction du premier pour les rayons de la première raie est $n = 1,525832$, et celui du second pour les mêmes rayons est $n = 1,627749$; il en résulte,

$$\alpha = \alpha' \cdot 0,8376;$$

c'est-à-dire, que l'angle du prisme de flint doit être seulement les 83 ou les 84 centièmes de l'angle du prisme de crown; celui-ci étant, par exemple, de 25° , le premier doit être de $20^\circ 56' 28''$.

Si l'on voulait que les rayons de la septième raie fussent sans déviation, il faudrait prendre pour n et n' les indices de réfraction correspondans à ces rayons, savoir : $n' = 1,546566$, $n = 1,671082$, et l'on en déduirait

$$a = a', 0,8145.$$

Par conséquent, pour $\alpha' = 25^\circ$, on aurait $a = 20^\circ 21' 43''$.

Ainsi, en supposant (Fig. 647) un prisme de crown $es'c'$ de 25° , et derrière lui un prisme de flint $fs'v'$ de $20^\circ 21' 43''$, le rayon blanc qui tomberait sur ce système dans la direction st serait décomposé et sortirait dans une direction telle que le rayon violet $t'v'$ de la septième raie serait parallèle au rayon incident, et le rayon rouge $t'a$ de la première serait incliné vers la base du prisme de crown, puisqu'il ne devient parallèle au rayon incident que pour un prisme de flint de $20^\circ 56' 29''$. Or, si le prisme de flint n'y était pas, on aurait un spectre en $a'v'$ dans lequel v' serait au-dessous de a' . En supposant donc que l'angle du prisme de flint augmente graduellement depuis 0 à $20^\circ 21' 43''$, il doit y avoir un angle pour lequel les rayons de la première et de la septième raie sortent parallèles entre eux, puisqu'en passant de $n'v'$ en av' , ils changent de position relative; cet angle est celui de l'achromatisme.

Après avoir démontré qu'il y a un angle qui donne l'achromatisme, il est facile d'en trouver la valeur; car les déviations α_1 et α_7 des rayons de la première et de la septième raie étant égales entre elles, et étant données par les équations,

$$\alpha_1 = (n_1 - 1) a - (n'_1 - 1) a'$$

$$\alpha_7 = (n_7 - 1) a - (n'_7 - 1) a'$$

on a

$$(n_1 - 1) a - (n'_1 - 1) a' = (n_7 - 1) a - (n'_7 - 1) a'$$

$$\text{d'où } a = a' \frac{(n'_7 - n'_1)}{n_7 - n_1}$$

Et, d'après les valeurs précédentes de n et n' pour la première et la septième raie, il en résulte

$$a = a', 0,4787$$

et puisque $a' = 25^\circ$, on a $a = 11^\circ 58' 3''$.

Ainsi, un système composé d'un prisme de crown n de 25° et d'un prisme de flint n' de $11^\circ 58' 3''$, est un système achromatique que les faisceaux blancs traversent sans que leurs rayons de la première et de la septième raie soient séparés. Cependant ces faisceaux éprouvent une déviation de $5^\circ 27' 63''$, comme il est facile de s'en assurer en mettant pour a et a' leurs valeurs, et pour n et n' leurs valeurs n_1 et n'_1 dans l'équation qui donne n , ou leurs valeurs n_7 et n'_7 dans celle qui donne n' .

C'est ainsi que l'on peut, dans tous les cas déterminer les rapports des angles que doivent avoir deux prismes, pour que deux rayons d'une réfrangibilité connue reprennent leur parallélisme entre eux après les avoir traversés.

Cependant il faut remarquer que l'achromatisme déterminé par ces conditions est d'autant plus incomplet, que les rapports des dispersions partielles des deux substances sont plus variables. Si ces rapports étaient les mêmes, les valeurs de a déterminées par l'équation précédente

$$a' = \frac{a'(n'_7 - n'_1)}{n_7 - n_1}$$

deviendraient les mêmes pour toutes les couleurs, et l'achromatisme serait alors parfait. C'est ce qui arriverait, par exemple, avec des prismes de flint $n^\circ 13$, et de térébenthine, comme on peut le voir dans le tableau de la page 382. Mais ces rapports étant, en général, variables d'une couleur à l'autre, il en résulte que la valeur de a , qui convient pour accorder deux couleurs, même les couleurs extrêmes, n'est pas celle qui convient pour accorder les nuances intermédiaires. Dans ce cas, de quelque manière que l'on s'y prenne, l'achromatisme est imparfait; pour y remédier plus complètement, on peut alors employer trois ou quatre prismes de diverses substances. Car, il est facile de voir par la formule générale (page 386) que l'on peut faire sortir parallèlement autant de rayons de réfrangibilité différente que l'on emploie de prismes.

L'achromatisme des lentilles se détermine par les mêmes principes. Nous avons vu (535) que la distance focale principale d'une lentille est donnée par la formule.

$$f = \frac{an'}{(n-1)(n'-1)}$$

Supposons qu'après avoir fait une lentille convergente de crown, on se propose de déterminer les courbures d'une lentille de flint, par la condition que les rayons de la première et de la septième raie fassent leurs images à la même distance après avoir traversé le système. Admettons, pour plus de simplicité, que la lentille de crown soit bi-convexe, avec ses deux rayons égaux, et que la lentille de flint ait aussi le même rayon de courbure du côté où elle touche celle de crown (Fig. 648); il restera à trouver le rayon de courbure de la seconde face de la lentille de flint. Soit a sa distance focale principale, pour les rayons de la première raie, et k , le point où concourraient les rayons parallèles de cette espèce, s'ils étaient modifiés seulement par la lentille de crown; il est évident que, par l'effet de la lentille de flint, ils iront converger en un point plus éloigné, par exemple, au point x ; et réciproquement si l'on mettait en n un point lumineux, les rayons de la première raie qu'il émettrait se trouveraient dirigés, après avoir traversé la lentille de flint, de manière à ce que leur prolongement passât au point k ; on a donc entre ces deux distances $ak = f$ et $ax = a$, la relation

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{a}$$

r_1 étant la distance focale principale de la lentille de crown, pour les rayons de la première raie, et r'_1 celle de la lentille de flint pour les mêmes rayons.

Or, par la condition que nous voulons remplir, la valeur inconnue de n devant être la même pour les rayons de la septième raie et pour ceux de la première, on aura pareillement pour ces derniers

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r'_1} + \frac{1}{n}$$

r_1 et r'_1 désignant les distances focales principales de la lentille de crown et de celle de flint, pour les rayons de la septième raie. Il en résulte

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2}$$

D'ailleurs pour la lentille de crown, dont les rayons sont égaux, on a en général

$$r = \frac{n}{2(n-1)}$$

et par conséquent

$$r_1 = \frac{n}{2(n_1-1)} \text{ et } r_2 = \frac{n}{2(n_2-1)}$$

d'où il résulte

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{2(n_1-n_2)}{n}$$

Pour la lentille de flint, dont les rayons n et n' sont inégaux, on a

$$\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} = \frac{(n'-n)(n_1-n_2)}{nn'}$$

d'où il résulte enfin

$$n = \frac{n'(n_2-n_1)}{n'_2-n'_1-2(n_2-n_1)}$$

et d'après les valeurs précédentes de n_1 , n_2 , n'_1 , n'_2

$$n = 23,47 n.$$

c'est-à-dire que le rayon n' doit être plus que vingt fois le rayon n .

Si l'on suppose, par exemple, $n = 1^m$, on aura : $n' = 23^m,47$, et la valeur de n , ou la distance focale principale de cette lentille composée devient alors facile à calculer ; on trouve $n = 2^m,22$.

Mais la coïncidence des rayons extrêmes ne détermine pas celle des rayons intermédiaires, et, pour que l'achromatisme soit parfait, il faut pour les lentilles, comme pour les prismes, que les dispersions partielles conservent entre elles le même rapport dans toute la longueur du spectre. Au reste, le calcul des objectifs des lunettes présente une difficulté de plus dans le détail de laquelle nous ne pouvons entrer ici ; c'est le compte que l'on doit tenir de l'aberration de sphéricité.

CHAPITRE V.

DE LA VISION ET DES INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

Vision.

548. *Structure de l'œil.* — La forme extérieure de l'œil est à peu près celle de deux segments sphériques de différents rayons, réunis par leur base (Fig. 649). Le rayon du plus grand segment $ss's'$ est d'environ 10 millimètres, et celui du plus petit $ss's'$ de 7 à 8 millimètres seulement ; c'est celui-ci qui offre au dehors la partie diaphane et saillante de l'œil. Cette forme régulière est déterminée et maintenue par une membrane épaisse et fibreuse, d'un tissu ferme et serré, que l'on nomme la *sclérotique*, lorsqu'on la considère dans son ensemble comme enveloppe externe de l'organe, mais on la nomme *cornée transparente* dans sa partie antérieure et diaphane $ss's'$, et *cornée opaque* dans ses parties ss et $s's'$, qui forment le blanc de l'œil, et dans toute sa partie postérieure $ss's'$. Aux points s et s' , où la cornée opaque devient transparente, se trouve tendue, dans l'intérieur de l'œil, la mem-

brane de l'*iris* ss' , ayant comme on sait la forme d'un plan circulaire, dont l'intérieur est percé d'un trou rond plus ou moins ouvert, et parfaitement noir que l'on nomme la *pupille*. C'est l'iris qui donne à l'œil sa couleur ; s'il était transparent comme la cornée, l'œil serait noir comme la pupille, et la vision ne pourrait s'accomplir ; il est donc essentiellement opaque, et cette condition est remplie par des enduits diversement colorés, dont il est revêtu. Derrière l'iris se trouve suspendu le *cristallin* cc' ; il est enfermé dans une membrane particulière que l'on nomme la *capsule cristalline*, et qui va s'attacher à la cornée par tous les points de son contour. Cette capsule forme une cloison continue qui sépare l'œil en deux parties ou en deux *chambres* ; le liquide qui remplit la *première chambre* ou la chambre antérieure se nomme l'*humour aqueux*, et celui qui remplit la *seconde chambre* se nomme *humour vitré*, parce qu'il a eu quelque sorte l'apparence du verre fondu. Les humeurs de

l'œil sont enveloppées d'une membrane particulière, comme tous les autres liquides contenus en repos dans des cavités organiques; celle qui enveloppe l'humeur aqueuse se nomme simplement *membrane de l'humeur aqueuse*; celle de l'humeur vitrée se nomme *hyaloïde*. Un grand nombre de ses replis pénètrent dans l'humeur elle-même, et forment en la traversant des mailles ou des cloisons dont on ne connaît pas l'usage.

Entre l'hyaloïde et la sclérotique, se trouvent encore deux autres membranes, la choroïde et la rétine, qui jouent dans le phénomène de la vision le rôle le plus important.

La *choroïde* est une membrane vasculaire qui revêt toute la face interne de la sclérotique, depuis le fond de l'œil jusqu'à la capsule cristalline; il y a même quelques anatomistes qui prétendent qu'elle se prolonge en avant pour venir former l'iris, en se repliant sur elle-même.

La *rétine* n'est autre chose que l'épanouissement du nerf optique; elle est simplement posée sur la choroïde, et s'en détache avec la plus grande facilité lorsque l'on coupe l'œil pour en faire l'anatomie. Cette membrane, ou plutôt ce lacs nerveux, offre une transparence presque complète.

Telle est à peu près la disposition générale des principales pièces qui composent l'organe de la vue. Les dimensions moyennes d'un œil humain sont ainsi qu'il suit :

Rayon de courbure de la sclérotique	10 à 11 millim.
id. de la cornée transp.	7 à 8
Dismètre de l'iris.	11 à 12
id. de la pupille.	3 à 7
Épaisseur de la cornée transp.	1
Distance de la pupille à la cornée	2
Distance de la pupille au cristallin	1
Rayon antérieur du cristallin.	7 à 10
Rayon postérieur id.	5 à 6
Diamètre du cristallin.	10
Épaisseur id.	6
Longueur de l'axe de l'œil.	22 à 24

Nous allons examiner maintenant, d'après ces données, les modifications qu'éprouve la lumière en traversant les divers milieux qui composent l'œil.

Lorsqu'un point lumineux est placé à 8 ou 10 pouces au devant de l'œil sur l'axe du cristallin, une partie du faisceau qu'il envoie tombe sur le blanc de l'œil, et se trouve irrégulièrement réfléchi dans tous les sens; une partie plus centrale tombe sur la cornée transparente, pénètre dans l'humeur aqueuse en se réfractant, et ses bords extérieurs viennent éclairer le contour de l'iris, tandis que la partie tout-à-fait centrale passe par l'ouverture de la pupille, traverse le cristallin, l'humeur aqueuse, la rétine elle-même, et va tomber sur la choroïde. La lumière que reçoit l'iris est irrégulièrement réfléchi dans tous les sens, et va reporter au dehors la forme et la couleur de cette

membrane. Le faisceau central qui traverse la pupille se trouve réfracté par le cristallin, comme il le serait par une lentille convergente; car le cristallin est plus réfringent que l'humeur aqueuse, et plus aussi que l'humeur vitrée; par conséquent, sous certaines conditions, ce faisceau, devenu convergent, doit former quelque part une image du point lumineux d'où il est émané. Supposons pour un moment qu'il forme cette image exactement sur la rétine ou sur la choroïde en x ; alors, il est évident qu'un autre point lumineux x' fera une image pareille en x' , et qu'ainsi on aura au fond de l'œil une petite image $x\ x'$ de l'objet $x\ x'$. Cette image sera renversée, et présentera d'ailleurs toutes les nuances, tous les accens de lumière et tous les contours de l'objet lui-même.

C'est ce que l'on peut vérifier par l'expérience, en fermant le trou du volet d'une chambre noire par un œil de bœuf ou de mouton fraîchement préparé, et aminci à sa partie postérieure au point d'offrir une enveloppe translucide; l'observateur, placé dans la chambre noire, voit alors assez distinctement, sur le fond de l'œil soumis à l'expérience, l'image de la flamme d'une bougie ou d'un corps vivement éclairé; et l'on ne peut douter que les images du monde extérieur, si fidèlement tracées sur la choroïde, ne soient, dans l'état de vie, la première condition de la vision.

Ainsi, considéré d'une manière générale, le phénomène physique de la vision paraît être un résultat très simple des lois de la réfraction et du pouvoir des lentilles; mais lorsqu'on examine de plus près toutes les circonstances qui accompagnent la formation des images sur la choroïde, on rencontre des difficultés dont jusqu'à présent la science n'a pu rendre compte d'une manière satisfaisante. Parmi ces difficultés, qui sont nombreuses, les plus remarquables sont les deux suivantes :

1^o. L'œil est un instrument parfaitement achromatique, car les objets ne nous paraissent point environnés d'auréoles de diverses couleurs.

2^o. La netteté des images semble être indépendante de la distance des objets; car nous voyons nettement à quelques pouces de distance, et nous voyons nettement encore à quelques pieds, à quelques toises, à quelques lieues même, et jusqu'à plusieurs millions de lieues; l'image d'une étoile est aussi nette que celle d'une étincelle que nous avons sous les yeux.

Pour résoudre la première difficulté, il faudrait connaître exactement les indices de réfraction, les puissances dispersives, et les courbures de tous les milieux que la lumière traverse depuis la cornée jusqu'à la rétine; question d'autant plus compliquée et plus difficile, que les diverses parties du cristallin ont des réfractions et des puissances dispersives différentes. Cependant, sur ce point, on peut consulter avec intérêt les mémoires de M. GOSSET. (*Ann. de phys. et de chimie.*)

Pour résoudre la seconde, on a eu recours à di-

verses hypothèses que nous ne devons pas discuter ici, mais dont il est utile d'indiquer au moins la substance.

549. *Hypothèses par lesquelles on a essayé d'expliquer comment l'œil s'accommode aux distances.* — Pour qu'un objet fasse son image au foyer principal d'une lentille, il faut que sa distance soit très grande par rapport à la distance focale principale de cette lentille; par exemple, une centaine de fois (535). S'il s'éloigne plus, l'image reste sensiblement au même lieu avec la même netteté, seulement elle diminue de grandeur; mais s'il se rapproche, l'image recule rapidement, de telle sorte que sa distance est doublée quand l'objet est parvenu, au devant de la lentille, à une distance double de la distance focale principale. Or, puisque nous voyons nettement à 6 pouces et à toutes les distances plus grandes, il faut nécessairement, ou que la distance de 6 pouces soit très grande par rapport à la distance focale principale de l'œil, ou que l'ensemble de l'organe ait la propriété de s'accommoder à la distance, c'est-à-dire de se changer, suivant le besoin, en lentille plus forte ou plus faible. Le premier cas n'est pas celui que nous présente la nature dans l'œil de l'homme; c'est ce qui est évident d'après ses dimensions et ce que l'on peut vérifier aussi par l'expérience suivante :

Sur un verre mince et transparent, on fait une petite tache, et on la présente devant l'œil à 6, 8 ou 10 pouces de distance; alors, lorsqu'on regarde cette tache, on ne voit qu'une image confuse des objets qui sont au delà du verre; et réciproquement, lorsque, sans déranger l'œil, on regarde ces objets plus éloignés, on ne voit plus qu'une image confuse de la tache. Donc les objets qui sont à 10 pouces et ceux qui sont plus loin, ne forment pas leurs images en même temps et avec la même netteté sur le fond de l'œil, car on les verrait à la fois distinctement et sans confusion. Par conséquent l'œil s'accommode par un acte de la volonté, tantôt pour voir près, tantôt pour voir loin; et en effet, on a le sentiment d'une modification différente pour chacune des distances auxquelles on regarde. En observant sur quelle partie de l'organe cette modification s'exerce, on peut s'assurer que le diamètre de la pupille change avec la distance; elle se rétrécit toujours quand on regarde plus près, et s'agrandit toujours lorsqu'on regarde plus loin. Quelques personnes peuvent même produire à volonté ces changements, et alors elles voient les mêmes objets nettement ou avec confusion, suivant qu'elles tiennent la pupille plus ouverte ou plus serrée.

Pour expliquer cette propriété par laquelle l'œil s'accommode aux distances, on a proposé un grand nombre d'hypothèses.

Kepler avait supposé que l'œil s'allonge suivant son axe à mesure que l'objet se rapproche.

Le docteur Jurin avait émis une autre hypothèse, qui fut accueillie par Moulin, Rome, Ramdeu, et

plusieurs observateurs connus par leur exactitude; il pensait que la cornée seule change de forme et de courbure, et qu'elle devient plus convexe quand l'œil s'ajuste pour voir à des distances plus petites.

Bescartes, Pemberton, Albinus, Hunter et Others ont essayé de démontrer que le cristallin est composé de fibres musculaires, et qu'il peut changer de courbure en se dilatant ou en se contractant. Le docteur Young avait adopté cette opinion.

Porterfield soutenait que le cristallin peut éprouver un mouvement de translation; qu'il est poussé en avant pour regarder près, et reculé pour regarder loin.

La Hire et le Roy pensaient que la mobilité de la pupille suffit seule pour expliquer le phénomène.

Après toutes ces hypothèses, il est vrai de dire que les physiiciens ne savent encore à quoi s'en tenir. Ils s'accordent seulement à les rejeter toutes ou comme fausses ou comme incomplètes. Ainsi, il paraît bien certain que l'œil ne s'allonge pas, et que la cornée ne change pas de courbure; le mouvement du cristallin paraît impossible, et sa contraction très peu probable.

En m'occupant de quelques recherches sur ce sujet, j'ai été conduit à une remarque qui me semble importante. La dissection d'un grand nombre de cristallins m'a fait voir que ce corps n'est pas composé de couches concentriques comme on le suppose; mais de couches inégales en courbure et en épaisseur, comme on le voit dans les fig. 650 et 651. Cette dernière figure représente un cristallin dans lequel une des moitiés seulement a été disséquée. Il en résulte que les couches centrales étant tout à la fois plus courbes et plus réfringentes que celles des bords, les rayons qui traversent ces dernières ne peuvent pas converger au même point que ceux qui ont traversé les premières. Le faisceau central *c c'* converge plus près, et le faisceau des bords *a a'* va converger plus loin. Ainsi le cristallin n'est pas une lentille à un seul foyer, mais une lentille à un nombre infini de foyers différents. Ce fait me semble constant; sans essayer ici de le développer dans tous ses détails, j'essaierai d'indiquer comment il peut concourir à l'explication des phénomènes. D'abord si l'on place au devant de l'œil une lame opaque, percée d'un trou, dont le diamètre soit moindre que 1 millimètre, on distingue nettement tous les objets jusqu'à des distances beaucoup plus petites qu'on ne le pourrait faire sans cette précaution; c'est qu'alors le faisceau qui pénètre dans l'œil est si mince qu'il est à peine nécessaire qu'il soit anticié davantage par la convergence pour faire des images nettes. Aussi n'observe-t-on aucune différence lorsque le petit trou coïncide avec le bord ou avec le centre de la pupille. Avec un faisceau mince on peut donc voir nettement à toutes les distances et par toutes les zones du cristallin.

Quand on veut regarder à la vue simple et sans diaphragme un objet de plus en plus rapproché, on rétrécit de plus en plus l'ouverture de la pupille; c'est un fait facile à vérifier. Le but de ce rétrécissement est en effet d'arrêter les rayons qui tomberaient trop loin du centre du cristallin, et dont la convergence ne pourrait avoir lieu qu'au delà de la rétine.

Quand on veut regarder au loin, on ouvre, au contraire, la pupille autant qu'il est possible, afin que le faisceau incident soit large, et que ses bords extérieurs tombent près des bords du cristallin, pour converger ensuite sur la rétine. Alors, il est vrai, la partie centrale du faisceau converge trop tôt, mais l'épanouissement qu'elle peut prendre en allant depuis son point de convergence jusqu'à la rétine, est toujours très petit, et peut d'autant moins troubler la vision, que l'éclat de sa lumière est toujours très faible par rapport à l'éclat de la lumière des bords.

550. *Jugement sur la couleur, la forme, la situation, et la grandeur des objets.*

Nous distinguons les couleurs comme nous distinguons les sons, sans le secours du toucher; mais nous ne les distinguons pas de prime abord sans exercice ni sans comparaisons. Il faut des expériences souvent répétées pour reconnaître que le rouge, le jaune et le bleu, par exemple, ne font pas la même impression sur nous; comme il faut des expériences souvent répétées pour reconnaître une différence entre les sons graves et les sons aigus. Nous voyons la lumière avant de savoir dénombrer les couleurs; comme nous entendons du bruit avant de savoir dénombrer les sons. Ce résultat, qui semble bien naturel, se trouve confirmé par les observations que l'on a faites sur les aveugles de naissance, auxquels on est parvenu à rendre la vue dans un âge plus ou moins avancé.

Les images tracées sur la rétine sont pour la couleur, le contour et la forme, une représentation fidèle des objets; il suffit donc, pour que nous puissions prendre directement une idée de la forme des corps, que nous puissions distinguer les points de la rétine qui sont en repos et ceux qui sont affectés ou ébranlés par la lumière. Or, il n'y a pas un des points de notre enveloppe extérieure sur lequel cette distinction ne soit facile. Une piqûre au bras se distingue d'une piqûre au doigt, et nous pourrions, sans doute, avec le bras comme avec la paume de la main, saisir la différence qu'il y a entre un cercle et un carré. Par conséquent, il n'y a pas de raison pour que cette différence ne puisse être saisie avec plus de netteté encore, et plus de précision, sur la membrane de la rétine. Les objets donnent au fond de l'œil des images renversées, et de là ou a voulu conclure que naturellement nous devons voir les objets renversés. Cette conclusion serait légitime si l'on supposait que l'âme regarde les images, et qu'elle est placée derrière l'œil, comme une personne der-

rière le tableau d'une chambre noire. Mais si l'on suppose que l'âme ne regarde pas les images, qu'elle les sent, et qu'elle s'élève de la sensation à la cause qui la produit, il est évident que l'existence extérieure des corps et leur situation résultent pour nous d'un seul et même jugement. Il paraît toutefois que le sens de la vue seul ne pourrait pas plus nous conduire à la connaissance du monde extérieur que le sens de l'ouïe; tout semble indiquer que sur ce point le sens du toucher nous fournit des données indispensables, et qu'il ne peut être suppléé par aucun autre sens.

L'extériorité des objets une fois constatée, leur distance peut être appréciée de plusieurs manières. Le cône lumineux qui tombe sur la pupille est d'autant plus divergent que le point qui l'envoie est plus rapproché de l'œil, et, d'après ce que nous avons vu, il faut que l'œil s'ajuste à ces diverses distances, pour faire tomber sur la rétine une image suffisamment nette. La conscience que nous avons de cet ajustement ou de cette modification de l'œil, devient, par l'habitude, la donnée d'après laquelle nous portons notre jugement sur la distance. De plus, lorsque nous regardons avec les deux yeux, nous devons donner à leur axe optique une inclinaison relative d'autant plus grande que l'objet est plus rapproché : nous avons pareillement conscience de cette inclinaison; c'est une seconde indication qui vient au secours de la première et qui donne en général beaucoup plus de justesse à nos jugemens; car, il est facile de se tromper quand on juge avec un œil, à moins de s'y être exercé.

On appelle *distance de la vision distincte* la distance à laquelle nous voyons nettement et sans effort divers objets, tels, par exemple, qu'une page imprimée en caractères ordinaires. Cette distance est d'environ 10 pouces pour les vues moyennes, elle est de plusieurs pieds pour les vues presbytes, et seulement de quelques pouces pour les myopes. Au reste, elle varie avec les dimensions des objets; des lettres très fines, par exemple, et des lettres de moyenne grandeur ne peuvent être distinguées à la même distance.

Lorsque les objets sont assez éloignés pour qu'en les regardant les axes optiques des deux yeux deviennent sensiblement parallèles, nous n'avons plus de règle sûre pour déterminer leur distance; alors nous avons recours à des considérations plus ou moins trompeuses : nous tenons compte de l'éclat de la lumière, de la netteté avec laquelle nous distinguons les détails, de la grandeur des objets eux-mêmes, si elle nous est connue d'avance, etc.; par ces divers moyens, habilement combinés, quelques observateurs parviennent à une remarquable précision dans leurs jugemens; mais s'ils changent de lieu ou de climat, leur science est à chaque instant déçue par un autre aspect du ciel, un air plus pur ou plus brumeux, ou par des objets d'une forme nouvelle.

Le jugement de la *grandeur* est, en général, une conséquence du jugement de la distance. L'image d'un vaisseau peut être au fond de l'œil d'un observateur beaucoup plus petite que celle d'une barque, et cependant l'observateur ne s'y trompera pas, il dira que le vaisseau est plus grand que la barque, parce qu'il pourra juger que sa distance est beaucoup plus grande. Cependant quand nous savons d'avance la grandeur d'un objet, nous pouvons nous en servir pour estimer sa distance; c'est ainsi, par exemple, que la hauteur d'une tour est mieux appréciée quand on voit sur son sommet des hommes ou des objets d'une grandeur connue; mais si ces hommes étaient des nains, l'œil ne s'y laisserait pas prendre, il trouverait sans doute dans les modifications de la lumière des moyens de se défendre de l'illusion.

551. *Avec les deux yeux on ne voit qu'un objet, mais on le voit plus éclairé.*

Quand nous regardons un tableau avec les deux yeux, nous donnons aux figures qui le composent une position déterminée par rapport à nous, et comme cette position est exactement la même, soit que nous regardions avec l'un des deux yeux ou avec l'autre, il est impossible que le tableau nous paraisse double quand nous le voyons avec les deux yeux ensemble. Il n'en est plus de même lorsque nous regardons un objet qui se projette sur un second plan un peu plus reculé; cet objet cache à l'un des yeux, une partie du second plan et à l'autre une autre partie; par conséquent, avec les deux yeux, on est embarrassé de savoir sur quelle partie du plan il doit tomber; mais il n'arrive presque jamais que les deux yeux aient une égale force, ou plutôt il y en a toujours un qui l'emporte et auquel nous prêtons une plus forte attention; c'est d'après les impressions de celui-là que nous décidons.

Pour juger qu'un objet vu par les deux yeux est vu plus éclatant que s'il était vu par un seul, il suffit de regarder une bande de papier blanc avec l'un des yeux et de placer devant l'autre un obstacle qui nous en cache la moitié. La partie qui est vue par les deux yeux à la fois paraît beaucoup plus éclairée que celle qui n'est vue que par un seul.

552. *De quelques accidents de la vue.* — Les presbytes ont la vue *trop longue*, ils sont obligés de placer à deux ou trois pieds de distance un papier qu'ils veulent lire; plus près toutes les images sont confuses. Cette espèce d'infirmité qui vient d'ordinaire avec l'âge, résulte évidemment d'un défaut de convergence dans les faisceaux qui traversent les humeurs de l'œil; et l'on suppose, en général, qu'elle tient à un aplatissement de la cornée ou du cristallin. Tous les presbytes ont habituellement la pupille très peu ouverte, comme s'ils faisaient un effort continu pour se servir du centre du cristallin, plutôt que des bords, qui ont en effet,

comme nous l'avons vu, une distance focale encore plus grande.

Les myopes ont la vue *trop courte*, pour voir nettement les objets ils sont obligés de les approcher à la distance de quelques pouces; tout ce qui se trouve au delà est pour eux enveloppé d'un nuage, et ne forme au fond de l'œil que des images confuses. Cet accident est opposé au presbytisme, et il résulte en effet d'une cause contraire: les faisceaux qui traversent l'œil d'un myope éprouvent une trop rapide convergence; ils se croisent avant de tomber sur la rétine. On suppose, en général, que les myopes ont la cornée ou le cristallin trop convexe; on remarque aussi que leur pupille est toujours très dilatée, comme s'ils essayaient de se servir des bords du cristallin plutôt que des parties centrales, qui ont une distance focale principale encore plus désavantageuse pour eux, parce qu'elle est plus petite.

De quelque manière que s'accomplisse la vision distincte, soit qu'elle se fasse à la distance moyenne de huit à dix pouces, comme dans les bonnes vues, soit qu'elle se fasse à plusieurs pieds, comme chez les presbytes, ou à quelques pouces seulement, comme chez les myopes, il arrive toujours que, pour voir avec la plus grande netteté, il est nécessaire de tourner l'œil convenablement, de telle sorte que l'image tombe sur un certain point de la rétine et non pas sur un point quelconque. Le point, ou plutôt le petit espace sur lequel on amène les images pour voir le mieux possible, se nomme le *point sensible* de la rétine; il est placé en général près de l'axe de l'œil.

Il y a aussi au fond de l'œil un point que l'on appelle le *point insensible* ou *punctum cæcum*, c'est le petit espace circulaire occupé par l'extrémité du nerf optique et d'où partent tous les filaments nerveux qui s'entrelacent de mille manières pour former la rétine. La lumière qui tombe sur cet espace ne donne pas plus d'impression que si elle tombait sur un nerf quelconque mis à découvert; et, comme on ne distingue pas la lumière par les nerfs de l'ouïe, du goût ou de l'odorat, non plus que par les nerfs des bras ou des jambes, on ne distingue pas la lumière par le nerf optique avant qu'il soit épanoui en réseau et étalé sur la choroïde. Ce fait remarquable semble bien indiquer encore que la rétine sent les images sur la choroïde comme la main sent les formes, les contours et les divers degrés de poli des corps qu'elle touche.

On reconnaît l'existence et la position du point insensible de la rétine par l'expérience suivante (Fig. 604). Sur un fond noir et horizontal x on place deux petits disques blancs ou deux petites boules, dont les centres soient à environ trois pouces l'un de l'autre; ensuite on regarde d'en haut à la distance de 10 ou 12 pouces, et dans une position telle que l'œil droit soit verticalement au-dessus du disque du gauche et que la ligne des deux yeux soit parallèle à la ligne des disques. Ces

deux conditions étant remplies, on ferme l'œil gauche, et l'on regarde le disque de gauche avec l'œil droit, en l'éloignant ou en l'approchant un peu, mais toujours dans la même verticale; alors on trouve une position où le disque de droite est complètement invisible. Plus près ou plus loin il reparait à l'instant, et jamais on ne cesse de le voir si la ligne des deux yeux est seulement un peu oblique par rapport à celle des disques.

Le docteur Wollaston a observé sur lui-même un phénomène de vision extrêmement remarquable, et il en a tiré une conséquence bien curieuse sur la marche et la distribution des filets nerveux dans le nerf optique. Un jour, après un violent exercice de deux ou trois heures, il reconnut soudainement qu'il ne pouvait plus distinguer que la moitié des objets: en regardant, par exemple, le mot *NEWTON*, il voyait les trois dernières lettres *TON* sans rien apercevoir des trois premières; de même, en regardant un homme en face, il ne voyait que la moitié de sa figure et la moitié de son corps, etc. Ce phénomène de *semi-vision* dura un quart d'heure environ; il avait lieu pour un œil comme pour l'autre, ou pour les deux ensemble; c'était la moitié gauche des objets qui était invisible, c'était par conséquent la moitié droite de chacun des yeux qui était insensible (Fig. 669).

Vingt ans plus tard, en 1824, le même phénomène se renouvela sans aucune cause apparente, mais en sens inverse; c'était, cette fois, la moitié droite des objets qui était invisible, et par conséquent, la moitié gauche des yeux qui était insensible. Wollaston a eu l'occasion de constater des affections pareilles sur deux de ses amis; pour l'un, elle a été passagère, pour l'autre, elle a été permanente et probablement accompagnée d'un épanchement.

M. Aragn a souvent éprouvé cette semi-vision, et comme Wollaston, tantôt à droite, tantôt à gauche, mais toujours pour un temps assez court. On peut remarquer que, dans aucun cas jusqu'à présent connu, le phénomène ne s'est manifesté sur un œil seulement, et que jamais non plus il ne s'est manifesté dans le sens horizontal; c'est toujours par des plans verticaux que se sont trouvés partagés les objets dont on n'apercevait que la moitié. Ces faits étant bien constatés, voici la conséquence physiologique que le Dr Wollaston en a tirée. Puisque les deux moitiés droites de l'œil peuvent perdre simultanément leur sensibilité sans que les moitiés gauches soient affectées, et *vice versa*, il est probable que c'est un seul et même nerf qui se distribue aux deux moitiés droites, et un autre nerf qui se distribue aux deux moitiés gauches. Or, il y a deux nerfs optiques *x* et *x'* (Fig. 669) qui sortent du cerveau pour venir se distribuer aux yeux et former les deux rétines par leur épanouissement; ces deux nerfs se rapprochent et semblent se croiser ou se confondre un instant, au-dessus du sphénoïde eu *e* *c'*; il faut donc qu'ils éprouvent une

semi-décussation, c'est-à-dire, qu'ils se croisent seulement à moitié. Pour le nerf de droite, la partie *c* n'est restée à droite et vient se distribuer en *ad*, tandis que la partie *s'* a passé à gauche pour aller se distribuer dans la partie *cd*; pour le nerf de gauche, la partie *e* s'est restée à gauche et se distribue en *cg*, tandis que la partie *n* s'est passée à droite pour aller se distribuer en *ag'*. C'est ainsi que le phénomène de la *semi-vision* devient une preuve du fait de la *semi-décussation*.

Les anatomistes avaient disputé long-temps sur la question de savoir s'il y a au-dessus du sphénoïde juxtaposition des deux nerfs optiques en *décussation* complète, c'est-à-dire, croisement de tous les filets. Les preuves pathologiques ne manquaient ni à l'une ni à l'autre des opinions; car on cite des cécités de l'œil droit accompagnées d'une atrophie complète du nerf optique gauche avant le rapprochement, ce qui annoncerait la *décussation*; et l'on cite aussi des cécités pareilles accompagnées d'une atrophie du nerf optique droit dans toute sa longueur, soit avant soit après le rapprochement, ce qui annoncerait une simple juxtaposition. Les observations du Dr Wollaston ne paraissent pas cependant avoir porté la conviction dans tous les esprits; M. Magendie a fait, par exemple, sur les lapins, des expériences intéressantes qui le conduisent à admettre la *décussation* complète; mais il ne faut pas oublier que Wollaston n'a parlé que des nerfs optiques de l'homme, et je ne connais jusqu'à présent aucune expérience bien faite qui soit contraire à son opinion.

Il y a plusieurs maladies qui peuvent produire l'affaiblissement ou même la perte totale de la vue. Quelquefois la cornée devient opaque et se couvre de taches blanches que l'on nomme des *taies*. Ces taches sont comme des écrans opaques posés devant la pupille, et leur grandeur, leur forme ou leur position produisent des phénomènes variés dont il est facile de se rendre compte d'après ce que nous avons dit des lois de la vision.

La pupille peut être complètement fermée par suite de quelques accidens; le seul remède est alors de faire une pupille artificielle, c'est-à-dire, une ouverture aussi rapprochée du centre qu'il est possible.

Le cristallin peut devenir opaque dans toute son étendue, ou seulement dans quelques parties; on est alors affecté de ce qu'on appelle la *cataracte*. Pour remédier à ces affections qui malheureusement ne sont pas rares, il faut déplacer le cristallin; l'opération se fait tantôt par *abaissement*, tantôt par *ablation*. Dans le premier cas, le cristallin est seulement enfoncé dans l'humeur vitrée et disparaît après quelque temps; dans le second cas, il est extrait par une ouverture que l'on pratique latéralement dans le globe de l'œil.

Après avoir rapporté les faits les plus intéressants et les mieux connus sur les phénomènes de la vi-

sion, nous pouvons maintenant étudier successivement les divers instruments d'optique.

Bésicles.

553. Les bésicles sont les lunettes dont se servent les presbytes et les myopes pour avoir une vision distincte des objets à la distance moyenne de 8 ou 10 pouces.

Supposons, par exemple, qu'un presbyte ne puisse voir nettement qu'à la distance de 30 pouces; alors il est évident que pour lui les images ne peuvent être nettes, à moins que la lumière ne pénètre dans ses yeux avec la divergence qu'elle a en venant de 30 pouces de distance. Ainsi, pour qu'il puisse voir comme une personne douée d'une bonne vue, les objets à 10 pouces, il suffit de placer les objets à cette distance et de modifier par une lentille la lumière qu'ils envoient, pour qu'elle ne soit pas plus divergente que si elle venait de 30 pouces. Par conséquent, la distance n de l'objet à la lentille étant de 10 pouces, la distance de l'image virtuelle x devra être de 30 pouces; on aura donc (535)

$$\frac{1}{30} = \frac{1}{r} + \frac{1}{10}$$

d'où $r = -15$.

C'est-à-dire, qu'un presbyte, qui voit naturellement à 30 pouces, doit employer immédiatement au devant de l'œil un verre convergent de 15 pouces de distance focale principale pour voir les objets à 10 pouces.

En général, si n représente la distance de vision distincte d'un presbyte, la distance focale principale r de la lentille convergente dont il doit faire usage pour voir à 10 pouces, sera donnée par cette formule :

$$r = \frac{10n}{10 - n}$$

Le signe moins qui précède la valeur numérique de r lorsqu'on met pour n sa valeur, annonce que la lentille doit être convergente.

Supposons maintenant qu'un myope ne puisse voir nettement qu'à 5 pouces, et cherchons quel verre il doit employer pour voir à 10 pouces. Pour qu'il puisse voir à 10 pouces, il faut évidemment que la lumière qui lui vient de cette distance soit aussi divergente que si elle venait de 5 pouces; il faut donc que sa divergence soit augmentée par la lentille, et la distance focale principale de cette lentille doit être telle qu'un objet placé à 10 pouces au devant d'elle, donne un foyer virtuel à 5 pouces. On a donc

$$\frac{1}{5} = \frac{1}{r} + \frac{1}{10}$$

d'où $r = 10$.

C'est-à-dire, qu'un myope qui voit nettement à 5 pouces, doit employer des verres divergens,

dont la distance focale principale soit de 10 pouces.

En général, si n représente la distance de vision distincte d'un myope, la distance focale principale de la lentille, dont il doit faire usage pour voir nettement à 10 pouces, sera donnée par cette formule :

$$r = \frac{10n}{10 - n}$$

résultat qui est le même que le précédent; seulement n pour les myopes est plus petit que 10, et les valeurs de r étant toujours positives, on voit que les lentilles seront toujours divergentes.

Loupes ou microscopes simples.

554. Un microscope simple n'est autre chose qu'une lentille convergente d'un très court foyer; on l'appelle aussi une *loupe*. Cet instrument sert à voir de petits objets ou de petits détails qu'il serait impossible de saisir à la vue simple. Les botanistes en font un usage continu pour observer les organes délicats des plantes; les horlogers pour travailler et pour ajuster les pièces qui doivent avoir à la fois une extrême petitesse et une extrême précision, etc.

L'objet que l'on regarde à la loupe simple doit être toujours placé en avant, à une distance moindre que la distance focale principale; sa position varie avec la portée de la vue, mais il est facile de déterminer dans tous les cas le point précis où il faut le tenir. En effet, soit x la distance à laquelle il faut placer l'objet au devant d'une loupe, dont la distance focale principale est r , en supposant que l'œil de l'observateur soit appliqué immédiatement contre la loupe, et que pour lui la distance de la vision distincte soit représentée par n ; il faut évidemment que les faisceaux qui partent de la distance x possèdent, après avoir traversé la loupe, la même divergence que s'ils venaient naturellement d'une distance n ; c'est-à-dire qu'après l'émergence, ils doivent faire leur foyer à une distance n . On a donc

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{r} + \frac{1}{x}$$

$$d'où x = \frac{r n}{r - n}$$

Si la loupe a, par exemple, 1 pouce de foyer, on aura $r = 1$ et $x = \frac{n}{1 - n}$

Ainsi, pour une bonne vue, n étant égal à 10 ou 11, aurait $x = \frac{10}{1 - 10}$, c'est-à-dire que l'objet devrait être

placé à 10 millièmes de pouce au devant de la loupe. Un myope pour lequel n serait égal à 5, le placerait seulement à 5 sixièmes de pouce, et un presbyte pour lequel n serait égal à 60, le placerait à 60 soixante-unièmes, c'est-à-dire presque exac-

tement au foyer. La figure 659 représente la marche des rayons dans la loupe : aa est la position de l'objet, et $a'a'$ celle de son image virtuelle. Vue du centre optique c de la loupe, l'objet et l'image sont vus sous le même angle, et les triangles semblables aca et $a'c'a'$, donnent

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{C'F'}{CF} = \frac{F'D}{F'D} = \frac{F'D}{F'D}$$

$A'a'$ divisé par aa est le rapport de la grandeur de l'image à celle de l'objet ou le *grossissement* ; ainsi la loupe précédente de 1 pouce de foyer, donne un grossissement de 11, pour une vue moyenne, de 6 pour un myope de 5 pouces, et de 61 pour un presbyte de 60 pouces.

Il est facile de voir qu'une loupe de 1 ligne de distance focale principale donnerait pour les trois vues précédentes des grossissements respectifs de 121 pour la vue moyenne, 61 pour le myope, et 721 pour le presbyte.

Les loupes d'un très court foyer sont très difficiles à travailler. Mais les physiciens avaient imaginé autrefois divers moyens ingénieux de suppléer au travail mécanique : les uns tiraient le verre en fil très fin, et faisaient fondre le fil à la flamme de l'alcool ; la capillarité le rassemblait alors en une goutte très sensiblement sphérique ; les autres, après avoir choisi du verre très pur, en mettaient quelques parcelles dans un petit trou creusé dans du charbon, et les faisaient fondre à la flamme du chalumeau ; la goutte se rassemble comme dans l'expérience précédente, et quand elle est très petite, elle n'est pas sensiblement aplatie par son poids. Ces moyens, et quelques autres pareils, peuvent encore être employés avec avantage. Cependant on doit préférer les loupes *prismatiques* du Dr Wollaston. Ces loupes se composent de deux segments sphériques, séparés par un diaphragme opaque, qui arrête les rayons des bords (Fig. 659 bis) ; elles ont le double avantage d'avoir un court foyer et très peu d'aberration de sphéricité, parce que les rayons qui passent près du centre peuvent seuls arriver à l'œil.

Chambre claire ou camera lucida.

555. *Chambre claire de Wollaston.* — Cet appareil sert à tracer une image fidèle, d'un objet, d'un édifice, d'un paysage, etc. Il se compose essentiellement d'un prisme quadrangulaire ac (Fig. 682), ayant en a un angle droit, et en a' un angle obtus de 135° . La face cs est tournée vers l'objet dont on veut prendre le dessin ; ax , par exemple, étant l'axe d'un pinceau envoyé par un point de cet objet, on voit que ce rayon, après avoir pénétré perpendiculairement dans l'intérieur du prisme par la face ca , éprouve en a une première réflexion totale sur ca , en a' une seconde réflexion totale sur ab , et vient enfin sortir perpendiculairement à la face as , près du sommet a du prisme. L'œil étant placé un peu au-dessus de cette face, de manière que la

pupille soit en pe' , son milieu correspondant au sommet a , il est évident 1^o que par la moitié antérieure de la pupille on verra, par réflexion, l'image de l'objet x sur le prolongement de ax ; et 2^o que par l'autre moitié de la pupille on verra directement le point d'un tableau horizontal, sur lequel cette image se projette. Ainsi, en tenant avec la main la pointe d'un crayon sur ce point du tableau, on pourra distinguer à la fois l'image et la pointe du crayon. Ce raisonnement s'appliquant aux points voisins du point x , il en résulte que l'on verra sur le tableau une image d'une certaine étendue, et la pointe du crayon en pourra tracer les contours les plus délicats. Tel est le principe sur lequel repose la construction de la chambre claire de Wollaston, et c'est seulement pour fixer les idées que nous avons supposé la pupille partagée en deux parties égales par la verticale du sommet a ; car il est évident qu'elle peut varier de position dans de certaines limites ; la seule condition importante est qu'elle reçoive à la fois des rayons réfléchis et des rayons directs.

Pour que cet instrument soit commode dans la pratique et ne fatigue pas la vue, il y a quelques précautions qu'il ne faut pas négliger.

1^o. La pointe du crayon étant à la distance de la vision distincte, tandis que l'objet est en général très éloigné, il est évident que les faisceaux directs et les faisceaux réfléchis n'ont pas le même degré de divergence, et que l'œil ne peut pas s'ajuster pour voir avec la même netteté l'image qui résulte des premiers, et celle qui résulte des seconds. C'est pourquoi il faut mettre au devant de ac une lentille convergente qui donne aux faisceaux réfléchis la même divergence qu'aux faisceaux directs.

2^o. L'éclat de l'image réfléchie peut être assez vif pour éclipser l'image directe ou *vice versa* ; c'est pourquoi il faut adapter au prisme un verre coloré, que l'on tourne tantôt du côté de l'objet, tantôt du côté du tableau, pour atténuer l'éclat de l'image la plus vive.

3^o. Il faudrait beaucoup d'attention, et une assez longue habitude, pour maintenir l'œil dans une position convenable ; c'est pourquoi on lui donne un point de repère, en adaptant au prisme un petit diaphragme ou une petite pièce mobile, percée d'une ouverture de 5 ou 6 millimètres de diamètre ; quand cette ouverture est bien ajustée, il suffit d'en approcher la pupille et de la maintenir dans une position correspondante.

4^o. Les presbytes, et surtout les myopes, doivent se servir de leurs lunettes pour regarder dans la chambre claire ; c'est par ce moyen seulement qu'ils pourront placer le tableau à une distance commode, et obtenir des images qui ne soient ni trop grandes ni trop réduites ; car il est facile de voir que l'objet et l'image sont à peu près dans le même rapport que leurs distances au prisme.

La figure 684 représente une chambre claire de

Wollaston, disposée pour dessiner sur le tableau as' l'image des objets vus du côté de x .

v. Vis de pression qui sert à fixer le pied de l'appareil sur le tableau.

u. Charnière qui permet d'incliner plus ou moins le tube qui porte le prisme.

r' Tube qui sort du tube r , et qui peut être tiré plus ou moins.

a Verre coloré, tourné du côté du papier.

t. Lentille convergente, tournée du côté de l'objet.

556. *Chambre claire de M. Amici.* — En essayant de perfectionner la chambre claire de Wollaston, M. Amici, de Modène, a été conduit à diverses dispositions ingénieuses, dont nous ne pouvons ici indiquer les détails. (*Annales de chim. et de phys.* t. 22, p. 137.) Cependant nous ferons connaître la disposition suivante, qui paraît offrir de notables avantages (Fig. 683).

rr' est une lame de verre à faces parallèles, au devant de laquelle est disposé un prisme isocèle abc , dont l'angle c est à peu près un angle droit; le côté ac du prisme est perpendiculaire à la face de la lame. L'axe d'un faisceau qui vient dans la direction xy pénètre dans le prisme en se réfractant, et éprouve successivement deux réflexions totales, l'une sur la base ab du prisme, l'autre sur la surface antérieure du verre parallèle. L'œil le reçoit, et voit son image sur le prolongement de xx' ; en même temps il voit directement au delà du verre un point r très voisin du lieu de l'image, et qui se confond avec elle au fond de l'œil. On peut donc suivre les contours des objets avec plus de facilité que dans la chambre claire de Wollaston, parce que la pupille peut s'écarter dans des limites plus étendues, sans crainte de perdre de vue l'un des deux objets qu'elle doit saisir à la fois.

Chambre noire.

557. *Chambre noire.* La chambre noire est destinée à produire sur un tableau l'image réelle d'un champ de vision plus ou moins étendu. Dans sa construction la plus simple, elle consiste en un seul verre convergent xx' (Fig. 667), placé dans l'ouverture du volet d'une chambre complètement fermée xy . Si du centre optique c de la lentille on décrit un cône dont l'angle act soit égal au champ qu'elle peut embrasser, tous les objets compris dans ce cône viendront former des images nettes à des distances plus ou moins grandes dans l'intérieur de la chambre noire. Il semble par conséquent qu'il soit impossible d'avoir à la fois l'image distincte de tout le paysage at ; mais si le tableau est concave, et s'il est une portion de sphère $r'a'$ d'un rayon égal à la distance focale principale de la lentille, il suffira de l'incliner convenablement en $r'a''$, par exemple, pour avoir une représentation fidèle de tout le champ de vision; seulement, s'il y avait des objets très voisins, comme un arbre, il serait impossible d'avoir en même

temps son image et celle du sol sur lequel il se projette, en le regardant du point c .

Dans cet appareil, les images sont *renversées*. Pour les redresser et les amener à la portée de la vue, on place ordinairement un miroir étamé au dehors et en avant de la lentille; on obtient même par là un autre avantage, c'est qu'en faisant tourner le miroir on en l'inclinant de diverses manières, on peut amener sur le tableau successivement tous les points de vue qui sont au devant du volet.

Pour que les images soient plus vives et plus nettes, il est bon d'intercepter, avec des tubes et des écrans convenablement ajustés, tous les rayons lumineux qui ne portent pas du champ de l'instrument.

La figure 666 représente une chambre noire portative. Il sera facile, d'après ce que nous venons de dire, d'en saisir la disposition.

M. Vincent et Charles Chevallier, qui construisent ces divers appareils avec beaucoup de soins, ont imaginé un perfectionnement qui offre plusieurs avantages. Au lieu d'employer un ménisque convergent et un miroir séparé, ils travaillent une pièce de verre, un *prisme ménisque*, qui remplit à la fois le double objet. Ce prisme ménisque est représenté dans la fig. 658; c'est un prisme dont les faces cs et es sont, l'une concave, et l'autre convexe. La lumière qui entre par celle-ci éprouve une réflexion totale sur la base as du prisme, et, en sortant par la face convexe cs , elle a le même degré de convergence que si elle avait traversé un ménisque ordinaire.

Lanterne magique.

558. *Lanterne magique.* — Cet appareil, imaginé autrefois par le P. Kircher, mérite encore quelque attention de la part des physiciens, parce qu'il a été l'origine de plusieurs inventions, et parce qu'il n'est pas uniquement restreint à n'offrir à la curiosité que des images grotesques. Il se compose (Fig. 655) d'une lampe r destinée à produire la lumière, d'un miroir concave m , de deux lentilles convergentes c et c' , dont le seul effet est d'éclairer convenablement l'objet a ; enfin d'une lentille à court foyer xx' , qui doit produire les images sur un tableau éloigné. L'objet est une lame de verre sur laquelle sont peints divers sujets ou couleurs plus ou moins vives et plus ou moins foncées. Le miroir m et les lentilles c et c' sont ajustés pour donner en a sur le verre un cercle lumineux très brillant. Ce verre étant placé un peu plus loin que le foyer principal f de la lentille xx' , il est évident qu'il doit faire son image réelle à une distance plus ou moins grande de l'autre côté de cette lentille. C'est cette représentation amplifiée de l'objet qui forme le spectacle de la lanterne magique. Pour lui donner tout son éclat, on a soin de faire les expériences dans une chambre complètement obscure; la lampe et les verres sont enfermés dans une caisse de bois ou de fer-blanc, et les spectateurs, placés devant

le tableau, ne reçoivent d'autre lumière que celle de l'image et du champ circulaire dans lequel elle est circonscrite.

Fantasmagorie.

559. *Fantasmagorie.* — La fantasmagorie n'est qu'une modification de la lanterne magique : dans ces deux instruments les objets sont éclairés et amplifiés par les mêmes verres, ajustés de la même manière; seulement dans la fantasmagorie, les objets et le tableau doivent éprouver un déplacement relatif, combiné de telle sorte que le tableau devienne toujours exactement le lieu de l'image. Par exemple, quand l'objet se rapproche du foyer son image est plus grande et va se faire plus loin; il faut donc que le tableau s'éloigne d'une quantité convenable; au contraire, quand l'objet s'éloigne du foyer, son image est plus petite et vient se faire plus près, il faut donc que le tableau se rapproche; et pour que ces changements puissent s'accomplir, sans que l'image cesse d'être distincte et visible pour les spectateurs, il faut combiner un mécanisme assez simple pour que tous ces mouvements soient exécutés sans bruit et avec précision. Ces conditions remplies il en reste encore une autre non moins importante, pour donner aux apparitions fantasmagoriques tout leur prestige; il faut que les spectateurs soient dans les plus profondes ténèbres et ne distinguent d'autre lumière que celle qui vient prendre avec éclat les différents traits de l'image. Pour remplir cette condition, le plus sûr moyen est de faire le tableau avec du taffetas gommé ou plutôt avec une toile enduite de cire et très unie; alors sa translucidité est suffisante pour que l'image puisse être vue par derrière très distinctement à la distance de 15 ou 20 pas. Les spectateurs qui la regardent n'ont aucune conscience de la distance absolue, parce qu'ils ne distinguent aucun objet intermédiaire, et ils ne peuvent se défendre d'une illusion complète. On ne leur montre d'abord qu'une image très petite, qui paraît dans les ténèbres comme un point lumineux très éloigné, puis, cette image se développant peu à peu, semble s'avancer à grands pas et même se précipiter sur les spectateurs. Ce phénomène de vision est remarquable et montre à quel point il est facile de nous tromper par les yeux; car la connaissance des lois de l'optique et du mécanisme de l'appareil ne saurait nous sauver de l'illusion.

La figure 554 représente le détail d'une fantasmagorie; les objets sont peints sur verre, comme pour la lanterne magique, et glissent dans la concavité c ; on peut aussi en faire passer plusieurs à la fois et les faire mouvoir pour imiter des jeux de physionomie.

Microscope solaire.

560. *Microscope solaire.* — Cet instrument dont les effets peuvent être comptés parmi les plus eu-

rieux et les plus instructifs de l'optique a été imaginé en 1745, par Lieberkuhn, de l'académie de Berlin. Il a la plus grande analogie avec la lanterne magique de Kircher : c'est encore un système de verre pour éclairer l'objet et une lentille de court foyer pour en donner une image réelle; mais la lumière qu'on emploie est alors la lumière du soleil.

Le microscope solaire qui nous paraît maintenant le plus parfait, soit pour la netteté des images, soit pour la clarté et le grossissement, est représenté dans la figure 556, sur une échelle de demi-grandeur. Le système d'éclairage se compose d'un miroir plan de verre x , d'une première lentille éclairante x_1 , de 15 ou 18 lignes de diamètre, et d'une seconde lentille d'un court foyer x_2 que l'on appelle le *focus*. Le miroir x réfléchit la lumière solaire, et dirige dans le tube τ , parallèlement à son axe, un faisceau qui en doit remplir toute l'étendue; la lentille objective imprime à la lumière de ce faisceau un premier degré de convergence; le *focus* qui la reçoit ensuite la fait converger davantage, et de telle sorte qu'elle aille faire son foyer à très peu près sur l'objet qui est en expérience. Pour remplir cette condition il est nécessaire que le *focus* soit mobile, et on le fait mouvoir en effet au moyen d'une crémaillère qui règne le long de sa monture et d'un pignon dont le bouton s est au dehors du tube.

L'ajustement de l'objet est un point important : lorsqu'on veut observer par exemple les corps très petits contenus dans les liquides, comme les globules du sang ou les animalcules de différentes espèces, ou les molécules cristallines que déposent les dissolutions en s'évaporant, etc.; il suffit d'écarter une goutte du liquide sur une lame de verre à faces parallèles et de porter cette lame sous la lumière du *focus* en tournant le liquide de son côté. Dans plusieurs autres circonstances l'objet doit être simplement placé entre deux lames de verre; et il y a des cas enfin où il faut l'enfermer dans une boîte à faces de verre remplie de liquide; c'est ce qui arrive quand on veut observer la circulation du sang dans la queue des têtards ou dans les extrémités de quelques poissons, et aussi quand on veut observer la circulation des globules du chyle. Tous ces objets, disposés comme nous venons de le dire, peuvent être ajustés au microscope d'une manière commode au moyen du mécanisme qui est représenté en rr' (Fig. 556). r et r' sont des lames carrées de cuivre unies aux quatre coins par de petites tiges de même métal; sur chaque tige est un ressort en spire qui pousse la troisième plaque q contre la plaque r' ; c'est entre q et r' que se glissent les lames ou les assemblages de lames qui portent l'objet. Ce système de plaques doit encore tourner autour du tube τ , pour qu'il soit possible de donner à l'objet toutes les positions sans le déranger et même sans perdre de vue son image.

L'objet ainsi ajusté et convenablement éclairé

par le focus, il est facile d'en obtenir l'image amplifiée; pour cela on fait mouvoir la lentille qui est véritablement la lentille objective; cette lentille se déplace au moyen d'une crémaillère adaptée à sa monture et d'un pignon dont la bouton est en s' ; on l'approche et on l'éloigne de l'objet jusqu'à ce qu'on obtienne enfin une image nette et brillante sur un grand tableau de toile blanche ou de papier, placé à la distance de 10, 15, ou 20 pieds. Puisque l'image est réelle, il en résulte que l'objet se trouve au delà du foyer de la lentille L , et il sera facile, d'après nos formules sur les lentilles (535), de déterminer avec précision la position de l'objet, lorsqu'on connaîtra la distance focale principale de la lentille et la distance du tableau; il sera facile aussi d'en déduire le grossissement. Mais si l'on veut observer le grossissement d'une manière directe, il faudra prendre pour objet, un micromètre en verre portant des divisions de grandeurs connues, et mesurer l'étendue que ces divisions occupent sur le tableau.

Dans les microscopes anciens l'image est toujours sillonnée des couleurs du spectre, surtout près des ses contours et près des parties les plus opaques; MM. Vincent et Charles Chavalier sont parvenus à éviter cet inconvénient en adaptant, pour objectif, à leurs microscopes, des lentilles achromatiques d'un assez court foyer, comme, par exemple, de 2, 3 ou 4 lignes. Pour obtenir de forts grossissements on peut employer ensemble deux ou même trois de ces lentilles au lieu de la lentille unique que nous avons figurée en L .

Le microscope solaire, ainsi perfectionné, deviendra sans doute un instrument précieux pour une foule de recherches physiques et aussi pour les recherches de botanique et d'anatomie.

Mégascope.

561. *Mégascope*. — Cet instrument est destiné à donner des copies réduites ou simplifiées, d'une gravure, d'un tableau, d'une bosse ou d'un bas-relief qui n'est pas trop grande étendue. Il a été imaginé par Charles vers 1780, et depuis cette époque on en a fait plusieurs applications intéressantes pour les arts. Le principe de sa construction est encore celui de la lanterne magique, de la fantasmagorie ou du microscope solaire; le mégascope ne diffère de ces derniers instruments que par la nature des objets dont il donne les images, et par la manière dont ces objets sont éclairés. Ainsi, en dernier résultat, il se réduit à une seule lentille L (*Fig. 557*), au devant de laquelle on place l'objet a dont on veut avoir l'image réelle sur un tableau, ou dont on veut prendre la copie. Mais voici les principales conditions qu'il faut remplir pour avoir en même temps des images parfaitement nettes et pour varier les grossissements.

1°. La lentille L doit avoir 28 à 30 lignes de diamètre afin d'embrasser un champ assez étendu et de donner assez de clarté à l'image; elle doit être

montée dans un tube un peu long qui arrête la lumière des années et les reflets latéraux; on peut encore, pour mieux assurer cet effet, mettre dans le tube un diaphragme convenable. Enfin, au lieu d'une seule lentille on peut en mettre plusieurs à une petite distance l'une de l'autre, pour donner plus de convergence aux faisceaux incidents.

2°. Au devant de l'ouverture à laquelle on adapte avec soin le monture de la lentille, se trouvent fixés au même niveau deux barres de fer horizontales; on en voit une en ra , et on voit leur ajustement en ra' . Ces barres supportent une espèce de char cu qui roule sur des galets, et dont la planche verticale c est destinée à recevoir les objets. Une double corde, dont les extrémités reviennent dans la chambre noire, est attachée au char, et sert à le faire avancer ou reculer, pour approcher ou éloigner l'objet a . Enfin deux ou plusieurs miroirs plans de verre étamé sont disposés au devant du volet pour réfléchir sur l'objet l'image du soleil, et projeter les ombres dans un sens ou dans l'autre; lorsqu'on expérimente sur des bosses ou des bas-reliefs, les miroirs peuvent être fixés au char pour se mouvoir avec lui.

3°. Le tableau sur lequel on reçoit les images peut être en papier ou en mousseline comme pour le microscope solaire; alors on observe par devant. Cependant les jeux de lumière que donnent les reliefs se font beaucoup mieux sentir lorsqu'on reçoit les images sur une grande glace convenablement doucie ou dépolie; alors on observe par derrière, et dans ce dernier cas les images peuvent être calquées sur du papier végétal avec beaucoup plus de facilité.

Microscope composé.

562. *Principes de la construction du microscope composé*. — Le microscope composé est destiné, comme le microscope simple, à faire voir la forme, la structure et tous les détails des objets très petits. On l'appelle microscope *dioptrique*, *catoptrique*, ou *catadioptrique*, suivant que les amplifications y sont produites par la *réfraction*, par la *réflexion*, ou par la *réflexion* et la *réfraction* réunies. Nous nous occuperons plus particulièrement ici du microscope *dioptrique*, parce qu'il est à la fois le plus utile et le plus répandu.

Les dispositions très diverses que l'on a successivement données à cet instrument reposent en dernier résultat sur les deux principes suivants :

1°. Les objets que l'on veut soumettre à l'expérience se placent au devant d'une lentille convergente as et un peu au delà de la distance focale principale (*Fig. 650*). Cette lentille, simple ou composée, achromatique ou non achromatique, se nomme la *lentille objective*, ou l'*objectif* du microscope.

2°. Les images réelles et amplifiées que donnent les objets, à une distance plus ou moins grande derrière l'objectif, sont regardées avec une seconde

lentille convergente *cc'* qui fait l'office d'une loupe. Cette seconde lentille, qui peut aussi être simple ou composée, achromatique ou non achromatique, se nomme la *lentille oculaire*, ou l'*oculaire* du microscope.

Ainsi tout microscope dioptrique est essentiellement composé d'un objectif ou d'un oculaire, et le grossissement définitif est le produit des grossissements qui résultent de chacun de ces verres, ou de chacun de ces systèmes de verres. Si l'objectif grossit, par exemple, 5 fois en diamètre et l'oculaire 10 fois, le grossissement sera 50 en diamètre et par conséquent 2,500 fois en surface; il serait 1,000 fois en diamètre et 1,000,000 de fois en surface, si les amplifications de l'objectif et de l'oculaire étaient respectivement 100 et 10, ou 50 et 20, ou 40 et 25, etc.

En ne considérant que ces principes fondamentaux du microscope, il serait facile d'en calculer en même temps les dimensions et les effets. Supposons, par exemple, que l'objectif ait 5 millimètres de distance focale principale, et l'oculaire 20, l'objet étant placé à 1/10 de millimètre au delà de la distance focale principale, son image réelle se formerait à 255 millimètres, et l'amplification de l'oculaire serait 40; pour un objet de 1/10 de millimètre de diamètre, l'image aurait donc 4 millimètres d'étendue. Ensuite, pour regarder cette image avec l'oculaire, il faudrait placer celui-ci à 18^m,62 au devant de l'image (554) (en supposant une vue moyenne de 10 pouces ou 270 millimètres), et l'on aurait encore un grossissement de 14,5; ce qui donnerait un grossissement définitif de $40 \times 14,5 = 580$. Dans cette hypothèse, l'instrument devrait avoir une longueur de $255 \times 18,62 = 273^{\text{m}},62$.

Avec le même objectif et le même oculaire on pourrait obtenir d'autres amplifications, moindres ou plus grandes, suivant que l'on placerait l'objet à des distances plus grandes ou moindres au devant de l'objectif; mais en même temps il faudrait pouvoir raccourcir ou allonger l'instrument, c'est-à-dire, diminuer ou augmenter la distance des deux verres; car le lieu de l'image réelle se rapprocherait ou s'éloignerait de l'objectif.

L'instrument dont nous venons d'indiquer la théorie est le microscope dioptrique dans toute sa simplicité, ou plutôt dans toute son imperfection, et tel qu'il sortit des mains des premiers inventeurs, vers 1620; c'est du moins ce que l'on peut conclure des documents incertains que l'histoire nous a conservés sur ce sujet; car, si l'on ne peut établir d'une manière précise, ni l'époque de l'invention, ni le lieu où elle prit naissance, ni le nom de l'inventeur, on peut juger cependant, avec quelque probabilité, que le microscope qui fut envoyé par Galilée, en 1612, à Sigismond, roi de Pologne, était construit comme nous venons de le dire, et qu'il en était de même encore du microscope dont Drebbel se servait à Londres en 1619

pour montrer avec enthousiasme une partie de ce monde nouveau et merveilleux dans sa petitesse qui avait jusque-là échappé aux yeux des hommes.

Depuis plus de deux siècles, on conçoit que le microscope a dû recevoir de nombreux perfectionnements; presque tous les expérimentateurs y ont travaillé avec plus ou moins de succès. Les uns ont donné plus de régularité aux verres de l'objectif et de l'oculaire, les autres ont trouvé le moyen d'éclairer convenablement les objets et de les disposer d'une manière commode pour en parcourir successivement toute l'étendue. D'autres enfin, comme Ramsden et Campani, se sont appliqués à composer l'oculaire, d'un système de deux ou de trois verres combinés entre eux d'après certaines lois théoriques ou empiriques, pour produire l'achromatisme dans les images. Tous ces essais ont enrichi la science d'un grand nombre d'instruments assez parfaits, et d'une foule d'observations intéressantes; mais le professeur Amici, de Modène, est parvenu il y a quelques années à des perfectionnements d'une haute importance. Son microscope a une immense supériorité sur tous les microscopes qui l'ont précédé. C'est pourquoi j'ai pensé qu'il serait utile de décrire ici avec quelque détail celui que M. Amici nous a envoyé en septembre 1829 pour notre cabinet de la Faculté des sciences de Paris.

553. *Microscope d'Amici.* — Cet instrument est représenté dans son ensemble (Fig. 681), et dans ses détails (Fig. 670 à 679), sur une échelle de demi-grandeur naturelle. L'objectif est en *aa'* (Fig. 681), l'oculaire en *cc'*. Le faisceau de lumière par lequel on voit l'objet s'élève d'abord verticalement, ce qui est une condition indispensable, sans laquelle les effets de la pesanteur troubleraient à chaque instant les observations; mais, au moyen d'une réflexion totale sur l'hypothéuse du prisme *x's'n'*, ce faisceau est renvoyé horizontalement vers l'oculaire, ce qui permet à l'observateur de prendre une position commode, soit pour varier ou prolonger ses expériences, soit pour dessiner les images qu'il aperçoit. Voici maintenant la disposition des diverses pièces et leur mécanisme.

1°. *Objectif.* L'objectif se compose d'une, deux ou trois lentilles achromatiques (Fig. 678), dont les distances focales principales sont de 8 à 10 millimètres; elles portent les nos 1, 2, 3; on peut employer la lentille n° 1 seule; ou les lentilles n° 1 et n° 2 avec l'attention de visser la première sur le tube, et la seconde sur la première; ou les lentilles n° 1, n° 2 et n° 3, avec l'attention de conserver encore leur ordre naturel en vissant le n° 3 sur le n° 2. Dans le premier cas on a le moindre grossissement, et l'objet se trouve le plus loin possible de l'objectif; dans le second cas le grossissement est plus fort et l'objet plus près; enfin dans le troisième cas le grossissement est plus fort encore, et l'objet se trouve amené à une très petite distance de l'objectif.

2°. *Oculaire.* Pour chacune des combinaisons de

l'objectif, on peut adapter à l'instrument l'un ou l'autre des six oculaires qui sont représentés sous les nos 1, 2, 3, 4, 5 et 6 dans les figures 672 à 677. Le 1^{er}, le 2^e, le 3^e et le 4^e sont construits sur la même principe; chacun d'eux se compose de deux verres plans convexes α et α' , dont la convexité est tournée du côté de l'image; entre ces verres et au point précis où vient se faire l'image réelle de l'objet, se trouve un diaphragme α'' dont l'ouverture est convenablement déterminée; dans cette ouverture on place ordinairement, à angle droit, deux fils très fins qui servent de micromètre. Les oculaires nos 5 et 6 sont de simples loupes α d'un foyer très court.

L'oculaire n° 1 se visse directement sur le tube $\tau\tau'$; pour se servir des autres, on enlève le premier et l'on visse sur le tube la pièce $z z'$ (Fig. 674), qui peut recevoir successivement les oculaires 2, 3, 4, 5 et 6. Cette disposition donne l'avantage d'avoir des grossissements très différents sans rien déranger, ni à l'objectif, ni à l'objet, ni au corps de l'instrument.

Il importe de mettre sur l'oculaire un carton noir $\alpha\alpha'$ qui arrête toute lumière étrangère, et il importe aussi de garnir en velours noir tout l'intérieur du tube $\tau\tau'$ pour empêcher les reflets latéraux qui viennent troubler la vision et ôter de la netteté aux images.

3°. *Ajustement et éclairage des objets transparents.* Les objets transparents doivent toujours être placés entre deux lames de verre, et il y a en général de l'avantage à les mouiller d'une goutte d'eau pure, pour qu'ils soient complètement environnés de ce liquide. Ces lames en général se maintiennent d'elles-mêmes à une distance convenable sans altérer l'objet. S'il arrive, dans quelques occasions, que l'objet doive être simplement placé à sec sur une lame transparente, on peut bien encore l'observer avec le même grossissement, mais son image est toujours moins claire et moins distincte. Le système des lames se place sur l'ouverture $v v'$ du porte-objet (Fig. 681), et la pièce $k k'$, qui s'élève ou s'abaisse à frottement dans l'ouverture aa' , sert à les maintenir et à les presser.

Le miroir concave $m m'$ rassemble la lumière des nuées ou celle d'une lampe pour la concentrer sur l'objet. Le diaphragme mobile rc , que l'on voit en plan dans la figure 679, sert à modérer l'éclat de la lumière; on le fait tourner plus ou moins pour amener celle des ouvertures qui convient le mieux à l'objet qui est soumis à l'expérience. En général, les corps très minces et très transparents exigent une lumière moins éclatante. Au-dessous du diaphragme se trouve encore un verre dépoli v que l'on tourne de manière à recevoir le faisceau lorsque l'on veut employer la lumière solaire ou celle d'une forte lampe.

Enfin l'objet est amené au foyer au moyen d'un pignon r dont le bouton est en r' ; il suffit de tourner le bouton r' dans un sens ou dans l'autre

pour faire monter ou descendre tout le système du porte-objet.

4°. *Ajustement et éclairage des corps opaques.* Les corps opaques doivent être placés sur un très petit disque de verre noir collé sur une lame transparente, et mis ensuite sur le porte-objet. Alors, pour les éclairer, on peut se servir de la lentille mobile $L L'$, ou du miroir $m m'$, ou de ces deux moyens réunis. Mais il convient toujours de visser à la dernière lentille objective le petit miroir percé $\alpha \alpha'$ (Fig. 678), qui réfléchit sur l'objet toute la lumière qu'il reçoit, ou de l'objet lui-même, ou du verre noir, ou du grand réflecteur $m m'$.

5°. *Moyens de parcourir le champ.* On peut voir diverses parties de l'objet en faisant tourner le corps du microscope $\tau\tau'$ sur le sommet de la colonne verticale qui le porte au moyen du pivot v ; mais il est toujours mieux de le fixer dans sa position, et de mouvoir seulement le porte-objet. Il y a pour cela deux vis micrométriques x et q ; la première sert à pousser en avant ou à retirer en arrière le char du porte-objet et tout ce qu'il porte; la seconde sert à le faire marcher latéralement de droite à gauche ou de gauche à droite. Au moyen de ces deux mouvements combinés on peut parcourir toute l'étendue de l'objet dans un sens ou dans l'autre sans perdre de vue son image.

6°. *Grossissement.* L'un des meilleurs moyens de déterminer la force amplifiante de ce microscope est d'employer une chambre claire existant en un simple verre parallèle rr' (Fig. 671); cet appareil s'ajuste sur l'un des oculaires au moyen de l'anneau $m m'$; on place l'œil en x et l'on regarde au travers du verre rr' , à une distance déterminée, une règle très exactement divisée: en même temps que l'on voit les divisions de la règle, on voit aussi par réflexion, sur la première surface du verre rr' , l'image de l'objet qui est exposé au microscope. Or, si cet objet est lui-même divisé d'une manière exacte, s'il est, par exemple, une petite bande de verre sur laquelle on ait tracé au diamant des cinquièmes, des dixièmes, ou des centièmes de millimètre, on verra d'un coup d'œil quel est l'espace occupé sur la règle par une des divisions du micromètre. Si 1/10 de millimètre occupe 10 millimètres, le grossissement est 100; s'il en occupe 20, le grossissement est 200, etc. Voici la table des grossissements pour le microscope de la Faculté.

Avec l'objectif n° 1 seul,

	En diamètre.	En surface.
L'oculaire N° 1 donne	89.	7921
Id. N° 2.	164.	25921
Id. N° 3.	228.	51984

Avec les objectifs n° 1 et n° 2 ensemble,

	En diamètre.	En surface.
L'oculaire N° 1 donne	196.	38416
Id. N° 2.	354.	125316
Id. N° 3.	501.	251001
Id. N° 4.	1108.	1227664

Avec les objectifs n° 1, n° 2 et n° 3 ensemble,

	En diamètre.	En surface.
L'oculaire N° 1 donne	257.	66049
Id. N° 2.	463.	214369
Id. N° 3.	656.	430336
Id. N° 4.	1453.	2111209
Id. N° 5.	2381.	5669161
Id. N° 6.	4135.	17098225

Ces grossissements ont été déterminés en projetant l'image sur une règle maintenue à 14 pouces 5 lignes, ou à 39 centimètres du centre de l'oculaire. On peut dire que rien n'est égal à la parfaite netteté des images jusqu'aux amplifications de 501, 463 et 656; pour les amplifications qui dépassent ces limites, la lumière des nuées devient insuffisante : il faut employer la lumière d'une forte lampe ou celle du soleil, et alors, quelque précaution que l'on prenne, les images deviennent en même temps moins tranchées vers les bords, et moins distinctes vers leur milieu.

On peut se ménager encore un moyen de varier les grossissements : c'est d'ajouter au tube du microscope une crémaillère qui permette de l'allonger plus ou moins; mais on court le risque d'écarter l'axe de l'oculaire de l'axe du faisceau qui donne l'image.

Connaissant la force amplifiante de l'instrument, il est facile de déterminer le diamètre absolu d'un objet quelconque soumis à l'expérience. Pour cela on projette son image au moyen de la chambre claire (Fig. 671), sur une règle divisée, et l'on note la longueur qu'elle y occupe à 14 pouces 5 lignes de distance du centre de l'oculaire; puis l'on divise cette longueur par la force amplifiante que l'on prend dans les tables précédentes, suivant l'objectif et l'oculaire dont on fait usage. Par exemple, avec l'objectif 1, 2 et 3, et l'oculaire n° 4, un globe de sang occupe à très peu près 12 millimètres; l'amplification correspondante à ces systèmes est 1453; en divisant 12 par 1453 on trouve 0,0082 millimètres, ou environ 8 millièmes de millimètre pour le diamètre absolu de ce globe de sang.

On arrive au même résultat d'une manière plus directe au moyen des vis micrométriques x et y dont nous avons parlé précédemment. La tête de la vis micrométrique x porte des divisions que l'on peut compter à partir d'un repère fixe. Par exemple, dans l'instrument que je décris, pour chaque division la vis avance ou recule de 0,00246 millimètres, ce qui forme à très peu près un 10 millième de pouce anglais. Par conséquent, s'il faut tourner de 10 divisions pour faire passer sous le fil micrométrique de l'oculaire l'image entière de l'objet, on peut conclure que, dans ce sens, le diamètre absolu de l'objet est 10 fois 0,00246, ou environ 25 millièmes de millimètre. La tête de la vis y est pareillement divisée; pour elle, chaque division répond à 0,0031 millimètres. Il faut seulement lors-

qu'on emploie cette méthode avoir la plus grande attention d'éviter le temps-perdu des vis.

Le prix de cet instrument est malheureusement un peu élevé; mais on peut espérer que le travail des verres deviendra bientôt plus sûr et moins coûteux; car il a déjà reçu en peu de temps des perfectionnements très sensibles. C'est M. Selligie qui paraît avoir, le premier, exécuté ou fait exécuter des objectifs achromatiques pour les microscopes (1824); et depuis qu'il a eu l'idée de faire cette heureuse application souvent recommandé par les physiiciens, on est parvenu à la rendre de plus en plus facile. MM. Vincent et Charles Chevalier y ont surtout contribué par leurs essais et par leurs efforts, et maintenant ils construisent, à Paris, des microscopes d'Amici qui semblent ne rien laisser à désirer.

564. *Microscope catadioptrique d'Amici.* — Cet instrument est représenté en demi-grandeur dans la figure 681 bis; il s'adapte sur le même pied que le microscope dioptrique de la figure 681. Nous pourrions en peu de mots donner une idée de sa construction. L'objectif est catoptrique, c'est-à-dire, que l'image qu'il donne est formée par réflexion. Le faisceau de lumière qui vient de l'objet, tombe sur un petit miroir plan de métal mm' , et se trouve ainsi renvoyé par la réflexion sur le miroir concave nn' ; c'est après cette seconde réflexion qu'il va former près de l'oculaire une image réelle et amplifiée de l'objet.

Les oculaires sont exactement les mêmes que ceux du microscope dioptrique (Fig. 672 à 677).

M. Amici travaille les miroirs, et surtout le miroir elliptique n avec une perfection que personne n'a pu atteindre jusqu'à présent. Cependant les grossissements de quatre ou cinq cents fois ne sont pas aussi purs dans cet instrument que dans le précédent.

565. *Détermination des indices de réfraction des liquides et des corps mous translucides, ou moyen du microscope.* — Nous pouvons expliquer maintenant le moyen très ingénieux que le docteur Brewster a imaginé pour trouver les indices de réfraction, au moyen du microscope (529, 3°). Supposons que l'on ait formé avec de l'eau, dont l'indice de réfraction est n' , un menisque plan concave dont la distance focale principale soit r , et le rayon de courbure n' , nous savons (535) qu'entre les trois quantités r , n' et n' , il existe la relation

$$r' = \frac{n'}{n' - 1}.$$

Pour une autre substance dont l'indice de réfraction serait n'' , la distance focale principale serait r'' , le rayon de courbure n' restant le même, et l'on aurait

$$r'' = \frac{n'}{n'' - 1}.$$

Il en résulte

$$\frac{n'' - 1}{n' - 1} = \frac{s'}{s''}$$

Et par conséquent

$$s'' = 1 + (n' - 1) \frac{r'}{r''}$$

Comme on connaît la valeur n' de l'indice de réfraction de l'eau, il reste, pour avoir s'' , à déterminer le rapport $\frac{r'}{r''}$.

D'abord, pour former des menisques de diverses substances qui soient tous plans concaves et de même rayon de courbure, il suffit de placer un fragment de ces diverses substances sur un verre plan à faces parallèles, et ensuite d'exercer une pression avec une lentille convexe, au point que le sommet de la convexité touche presque la surface du plan (*Fig. 680 bis*).

Or, si, pour faire cette expérience, on prend la lentille objective d'un microscope, et qu'on la reporte ensuite à l'instrument pour faire successivement trois observations sur un objet quelconque, la première avec la lentille seule et isolée, la deuxième avec la même lentille et un menisque d'eau, et la troisième avec la même lentille encre et un menisque d'une substance quelconque, de dire, par exemple, on pourra facilement déduire l'indice de réfraction de la cire. En effet, soit a , s' et s'' , la distance de l'objectif à l'objet dans la première, la deuxième et la troisième observation; soient r_1 , r_1' et r_1'' les distances focales principales de la lentille objective seule, de la lentille objective avec le menisque d'eau et de la lentille objective avec le menisque de cire; soit, enfin, x la distance à laquelle l'image se forme derrière l'objectif, distance qui reste la même dans les trois cas. On a évidemment, pour la première observation

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{s'}$$

et pour la deuxième

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{r_1'} + \frac{1}{s''}$$

Mais r_1' étant la distance focale principale du système, lentille et menisque d'eau seul, il est clair que si l'on mettait un point lumineux à une distance r_1' au devant du menisque d'eau seul, le point lumineux formerait son image en une distance r_1 ; et puisque nous avons supposé que r' était la distance focale principale du menisque d'eau seul, on aura

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r'} + \frac{1}{r_1'}$$

Cette équation, combinée avec les deux précédentes, donne

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{x}$$

La première et la troisième observation, combinées de la même manière, donneront pareillement

$$\frac{1}{r''} = \frac{1}{s''} - \frac{1}{x}$$

Et par conséquent,

$$\frac{r'}{r''} = \frac{(s'' - x)}{(s' - x)} \cdot \frac{s'}{s''}$$

En substituant cette valeur dans l'expression précédente, on en tire enfin

$$s'' = 1 + (n' - 1) \left(\frac{s'' - x}{s' - x} \right) \cdot \frac{s'}{s''}$$

Il suffit donc d'observer avec assez d'exactitude les trois distances s , s' , et s'' , pour en déduire la valeur numérique de n'' , ou de l'indice de réfraction d'une substance quelconque, pourvu que cette substance puisse être moulée en menisque plan concave, et qu'elle offre alors assez de transparence.

Télescope.

La pièce essentielle de tous les télescopes est un grand miroir concave de métal qui est tourné vers l'objet et qui en donne une image réelle et renversée d'après les lois dont nous avons précédemment parlé (522); mais comme il y a diverses manières d'observer cette image, il en résulte divers instruments que nous allons successivement examiner.

566. *Télescope de Grégory.* — Le grand miroir concave x (*Fig. 661*) est percé en son centre de figure d'une ouverture circulaire c c' . Les rayons incidents 1 $1'$ vont former en m m' une image réelle et renversée de l'objet. Cette image tombe au devant du petit miroir concave v , à une distance un peu plus grande que la moitié du rayon; alors elle devient comme un objet, et donne naissance à une seconde image redressée, qui est renvoyée dans l'ouverture c c' . Là un oculaire la reçoit pour l'amplifier encore, et l'œil la regarde en o ; une grande vis s s' dont le bouton est a , sert à éloigner ou à rapprocher le miroir v suivant que l'objet qu'on observe est plus près ou plus loin.

Cet instrument fut imaginé par Grégory avant 1633. (*Optico promota.*)

567. *Télescope de Cassegrain.* — Au petit miroir concave v de Grégory, Cassegrain substitua un petit miroir convexe x (*Fig. 662*), qui doit recevoir les rayons avant qu'ils aient formé l'image réelle de l'objet. Alors les rayons sont non-seulement réfléchis, mais leur convergence est diminuée, et l'image réelle et renversée vient se former au même lieu que la seconde image du télescope de Grégory,

là elle est reçue sur l'oculaire, et l'œil l'observe comme dans le cas précédent.

Ce télescope a sur le premier l'avantage d'être plus court et d'être moins exposé aux aberrations de sphéricité.

668. *Télescope de Newton.* — Au lieu d'un petit miroir concave ou convexe, Newton emploie un petit miroir plan r (Fig. 663), qui reçoit le faisceau sous un angle de 45° pour projeter l'image réelle latéralement sur un oculaire semblable aux précédents. Dans quelques-uns des instruments que Newton avait construits lui-même, il avait substitué au miroir plan de métal, un prisme rectangulaire tout-à-fait semblable à celui qui se trouve dans le microscope d'Amici.

Lunettes.

669. *Lunette de Galilée ou lunette de spectacle.* — Cette lunette se compose d'un objectif convergent $s s'$ (Fig. 665), et d'un oculaire divergent $a n'$; au sortir de l'objectif, les rayons s en iraient former une image réelle et renversée de l'objet en $m m'$; mais l'oculaire les reçoit avant le point de concours, et il doit être tellement placé qu'il leur imprime une divergence appropriée à la portée de la vue. On admet, en général, que les objets éloignés sont vu par des rayons sensiblement parallèles, soit qu'on les regarde à l'œil nu, soit qu'on regarde leurs images avec des verres; ainsi l'oculaire doit être placé en avant de l'image $m m'$ à une distance égale à sa distance focale principale; car c'est à cette condition seulement, qu'il pourra rendre parallèles entre eux les rayons qui convergent vers le même point de cette image; par conséquent si des points m et m' l'on mène au centre optique c de l'oculaire, les lignes $m c$ et $m' c$, les pincesaux qui concourraient en m et m' deviendront au sortir de l'oculaire, l'un parallèle à $m c$, l'autre parallèle à $m' c$, et l'objet sera vu sous l'angle $m c m'$; à l'œil nu, il serait vu sous l'angle $m a m'$, l'amplification est donc $a r$ divisé par $c r$, c'est-à-dire qu'elle est égale à la distance focale principale de l'objectif divisée par la distance focale principale de l'oculaire. Cette amplification est seulement celle qui appartient aux objets très éloignés; celle des objets plus rapprochés en diffère très sensiblement.

Cette lunette donne des images droites des objets, et n'a pour longueur que la différence des distances focales de l'objectif et de l'oculaire. C'est ce double avantage qui l'a fait préférer aux autres lunettes pour tous les usages habituels et particulièrement pour le spectacle. Elle fut inventée vers 1610; les uns en attribuent la découverte à un nommé Jacques Métius; les autres supposent qu'on la doit aux enfants d'un fabricant de besicles de Middelbourg, qui auraient par hasard disposé à la suite l'un de l'autre, un verre de presbyte et un verre de myope, pour regarder le coq d'un clocher. Quoiqu'il en soit de cette première origine, il est certain que vers l'an 1609 on avait trouvé à Midle-

bourg un moyen de voir les objets éloignés comme s'ils étaient près; le bruit s'en répandit en France et en Italie. Galilée était alors à Venise, et cette simple annonce fut un trait de lumière pour son génie; il se hâta de combiner des verres, et quelques nuits s'étoient à peine écoulées, qu'il avait déjà un instrument assez parfait pour découvrir les phases de Vénus, les satellites de Jupiter, les taches du soleil, etc., et pour trouver enfin dans les profondeurs du ciel les preuves fondamentales du système du monde et toutes ces grandes vérités qui semblaient inaccessibles à l'esprit humain. (*Nuncius astronomicus*, 1610.)

670. *Lunette astronomique.* — Elle se compose d'un objectif convergent $s s'$ et d'un oculaire pareillement convergent $a n'$ (Fig. 666). Au foyer de l'objectif en $m m'$ se forme une image réelle et renversée de l'objet, et l'oculaire est une simple loupe avec laquelle on regarde cette image; il en résulte :

- 1^o Que l'image reste renversée ;
- 2^o Que la longueur de la lunette est sensiblement égale à la somme des distances focales principales de l'objectif et de l'oculaire ;
- 3^o Que l'amplification est égale à la distance focale principale de l'objectif divisée par la distance focale principale de l'oculaire.

Cette lunette a été décrite pour la première fois par Kepler dans sa Dioptrique (en 1611); mais il paraît qu'elle ne fut exécutée que 20 ou 30 ans plus tard par le Père Scheiner. (*Rosa ursina*, 1656.)

671. *Lunette terrestre.* — L'objectif de la lunette terrestre est le même que les précédents; mais son oculaire (Fig. 668) est disposé pour remplir surtout deux conditions, 1^o pour redresser l'image renversée $m m'$ que donne l'objectif, 2^o pour diminuer autant qu'il est possible toutes les aberrations de l'instrument. C'est pourquoi on le compose de quatre verres, o , r , q , n ; les deux premiers o et r sont uniquement destinés à redresser l'image, et les deux derniers forment un oculaire composé, tout-à-fait pareil à l'oculaire du microscope, dont nous avons parlé précédemment. Il est nécessaire de disposer des diaphragmes en o et c pour arrêter les rayons des bords qui troubleraient inévitablement la netteté des images.

La perfection de ces instruments est surtout dépendante du travail de l'objectif; car, si la première image est à la fois parfaitement achromatique, bien distincte et vivement éclairée, il sera facile de construire des oculaires, pour la redresser et l'amplifier sans lui faire subir d'altération sensible. L'achromatisme dépend, comme nous l'avons vu (547), des indices de réfraction et des rapports de dispersion des substances qui composent l'objectif; la distinction dépend de la pureté de la matière et surtout de la courbure des surfaces; enfin la clarté dépend de l'ouverture de l'objectif et de sa distance focale principale. C'est la clarté de l'image qui permet une amplification plus ou

moins grande. Et voici sur ce point quels sont en général les résultats de la pratique.

Ouvertures de l'objectif.	Distances focales principales.	Applications.
1 . . . 13 lignes . .	9 pouces . .	15 fois.
2 . . . 16 . . .	14 . . .	18
3 . . . 20 . . .	19 . . .	22
4 . . . 25 . . .	30 . . .	30
5 . . . 32 . . .	42 . . .	36
6 . . . 48 . . .	30 . . .	200
7 . . . 60 . . .	72 . . .	600
8 . . . 72 . . .	84 . . .	400 à 900
9 . . . 96 . . .	144 . . .	400 à 900
10 . . . 132 . . .	216 . . .	600 à 900

Ainsi tout annonce que pour obtenir des gros-

sissemens de 1000 fois il faudrait pouvoir travailler avec une grande perfection des objectifs achromatiques qui auraient plus d'un pied d'ouverture. Mais lorsqu'on réfléchit aux difficultés prodigieuses que présente ce travail, on doit déjà regarder comme des chefs-d'œuvre de l'art les grands objectifs que MM. Cauchoix et Lerebours sont parvenus à construire dans ces dernières années. Sans doute ces puissans instrumens dont ils ont enrichi la science ne tarderont pas, entre les mains de nos astronomes, à donner des résultats du plus haut intérêt, soit sur la constitution physique des planètes, soit sur ces mouvemens remarquables des étoiles doubles qui ont déjà été observés avec tant de soins par MM. Herschell et South.

CHAPITRE VI.

DE LA DIFFRACTION ET DES INTERFÉRENCES DE LA LUMIÈRE.

572. Dans les divers traités de physique qui ont paru jusqu'à présent, on ne dit presque rien des phénomènes de diffraction. La plupart des auteurs se contentent d'annoncer que la lumière est déviée en passant près des extrémités des corps, et ceux qui donnent quelques détails sur ces déviations semblent moins s'attacher aux données fondamentales qu'aux expériences singulières qui frappent les yeux et dont les apparences peuvent être indéfiniment variées. Cependant, depuis les découvertes de Fresnel, la diffraction doit être regardée comme l'une des branches les plus intéressantes de l'optique, soit qu'on la considère en elle-même et dans la fécondité des lois auxquelles elle donne naissance, soit qu'on la considère dans ses conséquences qui sont, sans contredit, les plus vastes auxquelles la science puisse s'élever. Les difficultés qui se rencontrent pour traiter un tel sujet d'une manière élémentaire sont sans doute proportionnées à son importance; mais s'il faut prendre soin, dans l'enseignement de la physique, d'éviter les difficultés stériles, c'est-à-dire, celles qui ne conduisent à rien quand elles sont résolues, il faut aussi se faire un devoir d'aborder franchement les discussions qui peuvent conduire à des données fondamentales sur le jeu des forces naturelles et sur leur mode d'existence. Autrefois la science ne s'élevait pas jusqu'à ces conceptions primitives : l'expérimentateur observait des phénomènes et faisait de grandes découvertes sans se soucier de la transmission des particules de la lumière ou des vibrations de l'éther. Mais aujourd'hui les généralités sont épuisées : les faits en se multipliant sont devenus plus tran-

chés et plus caractéristiques; ils ne peuvent plus s'accommoder à toutes les hypothèses et s'expliquer également bien dans tous les systèmes. A cette période de la science, les faits les plus curieux sont incontestablement ceux qui tendent à faire prévaloir un système à l'exclusion des autres, et c'est là précisément ce qui donne tant d'importance aux phénomènes de la diffraction. Ils traquent une voie nouvelle pour les découvertes et l'on peut affirmer que les progrès ultérieurs de la science dépendent de leurs développemens. La tâche que je me suis imposée aurait donc été bien incomplètement remplie, si je n'avais redoublé de zèle et d'efforts pour introduire ces phénomènes dans la physique élémentaire. J'ose espérer que les personnes qui voudront lire avec un peu d'attention les pages suivantes, prendront une juste idée de ce qui a été fait autrefois et dans ces derniers temps sur cette partie de l'optique. Il m'a semblé nécessaire de retracer rapidement l'histoire des principales découvertes qui ont conduit au système des ondulations, en distinguant avec toute la sévérité que réclame l'intérêt de la science, ce qui est encore hypothétique de ce qui est irrévocablement démontré.

Phénomènes généraux de diffraction.

573. Franges produites par les bords des écrans.

— Un faisceau de lumière solaire réfléchi horizontalement, pénètre dans la chambre noire par une ouverture quelconque; il tombe sur une lentille L' d'un court foyer (*Fig. 685*), et continue sa route en formant un cône très divergent. Pour que la lumière de ce cône ne soit point mêlée de lumière

étrangère, on place autour de la lentille un grabat diaphragme av' ; et pour qu'elle soit homogène et simple autant que possible, on la fait passer au travers d'un verre coloré vv' , qui ne transmet que des rayons d'une seule couleur. Alors, si l'on dispose à quelque distance du foyer r un écran sc , dont le bord c soit mince et bien dressé, et que l'on reçoive son ombre sur un tableau rr' , on sur une glace légèrement dépolie par derrière, on observe les phénomènes suivants :

1°. La ligne rz , qui est la trace de l'ombre géométrique, n'est pas réellement la séparation de l'ombre et de la lumière.

2°. A droite de cette ligne, c'est-à-dire, du côté de l'écran, le tableau n'est pas noir, mais il est éclairé d'une nuance très sensible qui va s'éteindre à une assez grande distance, en suivant une dégradation *à peu près* uniforme.

3°. A gauche, au contraire, c'est-à-dire, du côté opposé à l'écran, on observe des franges ou des alternatives d'ombre et de lumière extrêmement remarquable : d'abord c'est une bande ou une frange brillante z , très vivement éclairée, et parallèle au bord c de l'écran ou à la trace de l'ombre géométrique : ensuite vient une frange sombre s , presque entièrement noire et parallèle à la première; c'est la frange noire du premier ordre; puis on voit paraître une seconde frange brillante z' , et après elle la frange sombre s' du deuxième ordre; et ces alternatives se continuent jusqu'à une grande distance du point c , tellement qu'il est facile quelquefois d'observer des franges noires du sixième ou même du septième ordre. Cependant à mesure que l'on s'éloigne de la ligne de l'ombre géométrique, les franges brillantes deviennent moins vives; et les franges sombres semblent prendre et prennent en effet une teinte lumineuse plus prononcée. Enfin elles s'effacent complètement, ou plutôt elles viennent se fondre dans la lumière qui a rasé d'assez loin le bord de l'écran.

Ces phénomènes se produisent, en échangeant d'apparence, pour toutes les distances du tableau rr' à l'écran sc , et pour toutes les distances de l'écran au foyer r qui représente ici un point lumineux; ils se produisent pareillement avec toutes les couleurs simples du spectre; mais l'on observe qu'en passant de la lumière rouge à la violette, les franges sombres et les franges brillantes diminuent graduellement de largeur, et deviennent par conséquent de plus en plus serrées et de plus en plus rapprochées de l'ombre géométrique. C'est pour cela, comme nous le verrons plus loin, que la lumière blanche ne donne pas des franges alternativement noires et blanches, mais des franges si-

ternativement colorées de diverses nuances; car chacune des couleurs simples éprouvant dans la lumière blanche, ce qu'elle éprouverait si elle était seule, on voit qu'en partant de l'ombre géométrique, c'est le violet qui doit manquer d'abord, et par conséquent la nuance rouge qui doit paraître la première, après la frange blanche qui borde l'ombre, puis, à la distance où le rouge manquerait s'il était seul, les autres couleurs ne manqueront pas, et leur mélange donnera une teinte composée. Ainsi, quand la loi des franges sera connue pour chacune des couleurs simples, il sera facile d'assigner d'avance l'ordre et la nature des teintes plus ou moins complexes que doit donner la lumière blanche.

Grimaldi est le premier observateur qui ait constaté l'existence de ces franges; il n'avait fait ses expériences qu'avec la lumière blanche (*Physicomathesis de lumine, coloribus et iride...* Bologne, 1665; propos. 1, n° 7 et suivants.)

Les franges brillantes et les franges obscures des divers ordres semblent prendre naissance au bord même de l'écran; et si, à partir de là, on suit leur trace jusqu'à la distance de plusieurs mètres, on peut constater qu'elles se propagent en suivant des lignes très sensiblement courbes. On a reconnu par des mesures exactes que ces courbes sont des hyperboles soumises aux conditions suivantes :

1°. Elles ont leur centro commun au point z , précisément au milieu de la ligne qui joint le bord c de l'écran et le point lumineux r .

2°. Elles ont leur sommet vers le point z , c'est-à-dire, sensiblement au bord même de l'écran.

3°. La position de leurs foyers est tout-à-fait indépendante de la nature de la substance qui compose l'écran; elle dépend seulement de la distance de l'écran au point lumineux, de la nuance simple qui produit les franges, et de l'ordre des franges que l'on considère.

Pour rendre sensible aux yeux ce phénomène de propagation en ligne hyperbolique, nous avons dû en exagérer l'effet dans la figure 635. Mais en même temps, pour donner une juste idée de l'étendue dans laquelle les phénomènes s'accomplissent, nous rapportons dans le tableau suivant les véritables valeurs de l'écart que présentent les franges par rapport à l'ombre géométrique. A ces hyperboles nous avons substitué les asymptotes, en indiquant l'angle qu'elles font avec la trace de l'ombre géométrique, pour les sept premières franges sombres de la lumière rouge et de la violette, et pour des distances du point lumineux à l'écran qui sont successivement de 10, 100 et 1000 millimètres.

Tableau des angles que les traces des sept premières franges sombres forment avec la trace de l'ombre géométrique.

	Inclinaison pour une distance de 1000 millimètres entre le point lumineux et l'écran.	Inclinaison pour une distance de 100 millimètres entre le point lumineux et l'écran.	Inclinaison pour une distance de 10 millimètres entre le point lumineux et l'écran.
Pour la lumière rouge.			
Premier ordre. . .	3° 35' . . .	1° 20' . . .	35' 51"
Deuxième ordre. . .	8° 15' . . .	16° 35' . . .	52' 25"
Troisième ordre. . .	8° 30' . . .	20° 32' . . .	1° 4' 54"
Quatrième ordre. . .	7° 32' . . .	23° 50' . . .	1° 15' 21"
Cinquième ordre. . .	8° 27' . . .	26° 44' . . .	1° 24' 31"
Sixième ordre. . .	9° 17' . . .	29° 20' . . .	1° 32' 44"
Septième ordre. . .	10° 3' . . .	31° 45' . . .	1° 41' 21"

Pour la lumière violette.

Premier ordre. . .	2° 55' . . .	9° 22' . . .	29° 36"
Deuxième ordre. . .	4° 20' . . .	13° 42' . . .	43° 18"
Troisième ordre. . .	5° 21' . . .	16° 55' . . .	53° 30"
Quatrième ordre. . .	6° 13' . . .	19° 40' . . .	1° 2' 15"
Cinquième ordre. . .	6° 50' . . .	22° 5' . . .	1° 9' 48"
Sixième ordre. . .	7° 40' . . .	24° 15' . . .	1° 16' 38"
Septième ordre. . .	8° 15' . . .	26° 14' . . .	1° 22' 53"

Ainsi, pour une distance de 1000 millim. entre le point lumineux et l'écran, les franges sombres sont très rapprochées l'une de l'autre ; car les asymptotes des hyperboles suivant lesquelles elles se propagent ne font entre elles, dans la lumière rouge, que des angles de 1° 40' pour le premier et le deuxième ordre, et seulement de 46' pour le sixième et le septième ordre. Ces angles sont encore moindres dans la lumière violette.

Pour une distance de 100 millimètres entre le point lumineux et l'écran, les franges sombres commencent à être distinctes et très étalées ; car celles du premier et du deuxième ordre font un angle de 8° 15' dans la lumière rouge, et de 4° 20' dans la lumière violette.

Enfin, pour une distance de 10 millimètres seulement entre le point lumineux et l'écran, les franges prennent une grande dilatation ; celles du premier et du deuxième ordre font un angle de 16° 34' dans la lumière rouge, et de 13° 42' dans la lumière violette.

On peut remarquer aussi que les franges du quatrième ordre dans la lumière rouge, coïncident sensiblement avec les franges du sixième ordre dans la lumière violette ; par conséquent, si la lumière incidente était blanche, l'on n'aurait aux distances correspondantes ni rouge ni violet, et la teinte dominante serait la teinte verdâtre qui résulte des couleurs moyennes du spectre.

Fresnel a le premier apporté une grande précision dans l'observation des franges et dans la mesure de leurs distances mutuelles. Voici les dispositions qu'il avait imaginées et au moyen desquelles il

a obtenu des résultats d'une exactitude surprenante.

1°. On emploie une *lentille cylindrique* au lieu d'une lentille sphérique. on l'ajuste de manière que son axe soit parallèle au bord de l'écran, et l'image que l'en obtient alors au foyer est une *ligne lumineuse* d'un grand éclat qui produit des franges parfaitement parallèles au bord rectiligne de l'écran. C'est la coupe d'une lentille de cette espèce qui est représentée dans la *figure 685*.

2°. Au lieu de recevoir les franges sur un carton blanc en sur un transparent de toile fine, de papier ou de glace dépolie, on les reçoit sur une lenpe d'un foyer plus ou moins court. L'œil placé derrière la loupe voit les franges qui sont au foyer, comme il voit avec l'oculaire d'une lunette l'image réelle d'une étoile ou d'un objet quelconque au foyer de l'objectif.

3°. Pour mesurer l'intervalle compris entre les points les plus brillants des franges brillantes on entre les points les plus sombres, on emploie une bonne vis micrométrique d'un pas très petit. Cette vis (*Fig. 686*) est fixée sur une forte plaque de cuivre *cc'*, qui est percée vers son milieu d'un trou d'un ou de deux centimètres environ, et qui peut être établie sur un pied solide ; vis-à-vis l'ouverture de la plaque est une pièce mobile *xx'* que la vis entraîne dans son mouvement. Si le pas de la vis est, par exemple, d'un demi-millimètre, et que sa tête, ou le cadran *tt'*, soit divisée en 100 parties ; pour chaque division qui passe devant l'index *x*, on peut être assuré que la pièce mobile *xx'* s'est avancée ou reculée de 5 millièmes de millimètre. Or, cette pièce représentée en coupe transversale par *xx'* (*Fig. 686 bis*), porte du côté de la lumière un simple fil de soie *ff'* tendu verticalement, ou un petit verre à faces parallèles sur lequel on a fait un diamant un trait fort délié ; et du côté de l'observateur elle porte une loupe plus ou moins forte *ll'*, qui peut être pensée en retirée de manière que le fil ou le trait micrométrique soit exactement à son foyer. Si l'on suppose maintenant que ce micromètre soit placé derrière l'écran de la *figure 685* à une distance convenable, et dans une telle position que les franges rouges ou violettes soient projetées perpendiculairement dans le champ de la loupe, il est évident qu'on pourra les distinguer avec une grande netteté, et, au moyen du mouvement de la vis, on pourra faire passer le fil *ff'* du point le plus sombre d'une frange au point le plus sombre de la frange suivante ; alors il suffira de lire le nombre des divisions du cadran *tt'* qui sont passées devant l'index *x* pour en déduire le mouvement transversal de la vis, qui sera par conséquent la distance absolue des franges, quel que soit le grossissement de la loupe.

Nous avons essayé de présenter les phénomènes précédents dans leur plus grand degré de simplicité ; mais on peut pressentir d'avance qu'ils se produisent encore avec de la lumière naturelle qui n'a

pas été concentrée au foyer d'une lentille, qu'ils se produisent même avec de la lumière parallèle, comme celle qui nous vient des étoiles. Enfin l'on peut conclure aussi qu'un écran à bord rectiligne produisant une inflexion on une diffraction dans la lumière, les écrans qui présenteraient, sur leurs bords, des courbures variées produiraient des phénomènes analogues. C'est là ce qui arrive en effet toutes les fois qu'une lumière quelconque, naturelle ou artificielle, passe près des extrémités des corps, quelle que soit leur nature ou leur forme, on peut s'en assurer aisément par une foule d'exemples qui se présentent sans cesse aux yeux les moins attentifs; mais quand les bords des écrans offrent diverses courbures, et quand la source qui envoie les rayons ne peut pas être assimilée à un point lumineux, les effets sont toujours beaucoup plus compliqués, comme nous le verrons plus tard.

574. *Des franges produites par des corps étroits et rectilignes.*

Le faisceau de lumière solaire pénètre encore dans la chambre noire, et se trouve décomposé et concentré comme dans l'expérience précédente. A une petite distance du foyer r (Fig. 687), on dispose un écran en un fil métallique d'un petit diamètre, dont la coupe est représentée en mn ; son ombre géométrique occuperait l'espace ac sur le tableau rr' ; mais l'inflexion que la lumière éprouve près des bords m et n du corps étroit produit les phénomènes suivants :

1°. Au dehors de l'ombre géométrique, on observe de chaque côté en at et en $a't'$ des franges diffractées analogues à celle qui produisent les bords rectilignes des écrans; elles sont identiques avec celles-ci quand le corps mn a une largeur de plusieurs millimètres; mais elles cessent d'être identiques quand le corps est très étroit. Dans tous les cas ces franges se nomment *franges extérieures*.

2°. Au dedans de l'ombre géométrique, entre a et a' on voit aussi des franges alternativement brillantes et sombres, on les nomme *franges intérieures*, parce qu'elles occupent toute l'étendue de l'ombre. Il est vrai qu'elles en sortent dans quelques circonstances pour se propager dans les franges extérieures; mais on les distingue parmi celles-ci, parce que en général elles sont plus serrées et plus déliées.

Les franges intérieures sont, comme les franges extérieures, plus larges dans la lumière rouge que dans la lumière violette; par conséquent la lumière blanche donne, dans l'intérieur de l'ombre, des franges colorées de diverses nuances.

Ce second fait est encore une découverte de Grimaldi (prop. 1, n° 14 et suiv.).

Le micromètre de Fresnel qui sert à mesurer les franges extérieures peut être employé avec le même succès pour mesurer les distances des franges intérieures; en suivant ainsi leur marche, on reconnaît qu'elles se propagent sensiblement en ligne droite. Cependant les indications de la théorie nous

apprendront qu'elles suivent aussi des hyperboles; mais, dans l'étendue que l'on peut embrasser, ces courbes se confondent sensiblement avec leurs asymptotes.

Ces phénomènes produits par un point lumineux se reproduisent encore avec un peu plus de complication dans la lumière naturelle ou dans la lumière parallèle; et les corps déliés qui ne sont pas rectilignes, mais courbés de diverses manières, présentent aussi des franges analogues plus ou moins sinuées et plus ou moins larges suivant les contours ou les épaisseurs des objets.

575. *Franges produites par des ouvertures étroites.*

A quelque distance de la lentille qui concentre la lumière dans les expériences précédentes, on dispose une mince feuille de métal dans laquelle est pratiquée une fente rectangulaire très étroite et parallèle à la ligne lumineuse du foyer r . Alors la portion de lumière simple qui passe au travers de la fente produit les phénomènes suivants :

1°. Le faisceau est très dilaté, c'est-à-dire qu'il occupe un espace beaucoup plus large que l'espace géométrique compris entre les deux lignes qui joignent le point lumineux aux deux bords de la fente.

2°. L'espace occupé par le faisceau présente dans toute sa largeur des franges alternativement sombres et brillantes; ces franges sont symétriquement distribuées de part et d'autre de la ligne qui passe par le point lumineux et par le milieu de la largeur de l'ouverture; ainsi en les comptant à partir de cette ligne qui est comme l'axe de l'ouverture, on aura deux franges du premier ordre, deux du deuxième ordre, deux du troisième ordre, etc.; on observe souvent les franges sombres du huitième ou même du neuvième ordre.

3°. La lumière rouge produit les franges les plus larges et les plus espacées; les autres couleurs simples donnent des franges qui se rapprochent et se resserrent progressivement; de telle sorte que les franges violettes sont beaucoup plus serrées que les rouges.

La figure 688 représente en a les franges du rouge, en v celles du vert, et en p celles du violet; ces trois espèces de franges étant observées à la même distance, et produites avec la même ouverture, placée à la même distance du point lumineux et du foyer r de la lentille.

Ce troisième fait est encore une découverte de Grimaldi (prop. 1, n° 25 et suiv.).

Les franges de cette espèce se propagent aussi suivant des hyperboles, comme on peut s'en assurer au moyen du micromètre de Fresnel, en mesurant l'écartement de deux franges du même ordre à diverses distances derrière l'ouverture.

La largeur de l'ouverture et sa distance au point lumineux déterminent la grandeur des franges, leur nombre et la courbure de la ligne suivant laquelle elles se propagent.

Pour étudier avec précision les lois de ces phé-

nomènes, on peut employer avec avantage l'appareil à biseaux qui est représenté dans la fig. 689. Il se compose d'une espèce de châssis en cuivre cc' , et de deux lames λ et λ' taillées en biseau et parfaitement dressées. La lame λ est fixe, et la lame λ' est entraînée par la vis micrométrique v . Le pas de la vis étant connu, et sa tête étant divisée en 100 parties, on peut facilement produire entre les biseaux un écartement donné, depuis quelques centièmes de millimètre jusqu'à plusieurs centimètres. Pour donner une juste idée de l'étendue dans laquelle se développent les franges produites par la diffraction que la lumière éprouve dans les ouvertures étroites, nous avons rapporté dans le tableau suivant la distance des franges sombres des cinq premiers ordres à l'égard de l'axe de l'ouverture; ces franges étant produites par la lumière rouge, dans une ouverture de 1 millimètre, et reçues à des distances croissantes par décimètre depuis 1 jusqu'à 20 décimètres. La plupart des nombres indiqués dans ce tableau sont des résultats d'expériences.

Tableau des distances entre les franges sombres de divers ordres et l'axe de l'ouverture pour diverses distances du micromètre, depuis 100 à 2000 millimètres. La largeur de l'ouverture = 1 mill.; la distance au point lumineux = 2010 mill.

Lumière rouge.

Distance du micromètre à l'ouverture.	Premier ordre.	Deuxième ordre.	Troisième ordre.	Quatrième ordre.	Cinquième ordre.
100	0,041	0,241	0,359	0,479	0,597
200	0,093	0,349	0,516	0,693	0,854
300	0,116	0,437	0,651	0,868	1,083
400	0,137	0,515	0,767	1,001	1,276
500	0,156	0,588	0,875	1,168	1,456
600	0,175	0,659	0,982	1,309	1,632
700	0,192	0,723	1,077	1,435	1,791
800	0,209	0,787	1,171	1,563	1,949
900	0,226	0,849	1,265	1,686	2,104
1000	0,242	0,911	1,356	1,808	2,258
1100	0,258	0,972	1,445	1,927	2,405
1200	0,274	1,030	1,534	2,045	2,551
1300	0,289	1,088	1,601	2,161	2,696
1400	0,305	1,145	1,708	2,277	2,841
1500	0,320	1,203	1,789	2,391	2,983
1600	0,335	1,261	1,879	2,505	3,125
1700	0,349	1,318	1,963	2,618	3,265
1800	0,365	1,375	2,048	2,730	3,404
1900	0,380	1,430	2,130	2,840	3,543
2000	0,395	1,416	2,214	2,951	3,681

Au moyen des données contenues dans ce tableau, on pourrait reconstruire par points les lignes que suivent les franges, et prendre ainsi une notion parfaitement exacte du phénomène.

La lumière naturelle, en tombant directement sur des ouvertures quelconques, produit des effets analogues, mais qui se compliquent de plus en

plus avec les divers accidens de courbure et les irrégularités que présentent les ouvertures.

576. Des franges produites par les bords des surfaces réfléchissantes.

A une distance quelconque du foyer r , où la lumière simple est concentrée, on dispose un miroir plan de métal, qui renvoie les rayons obliquement dans l'ombre; on observe alors le faisceau réfléchi et l'on y découvre les apparences suivantes:

1°. Les rayons qui sont tombés sur les bords du miroir, aux limites de sa surface polie, et qui se sont réfléchis en faisant l'angle de réflexion égal à celui d'incidence, ne séparent pas l'ombre de la lumière, comme ils sembleraient le devoir faire.

2°. Si le miroir est large, on distingue dans l'intérieur du faisceau réfléchi des franges alternativement sombres et brillantes, semblables à celles que présente le bord de l'écran dans la figure 685.

3°. Si le miroir est très étroit, les franges ne se montrent pas seulement dans l'intérieur du faisceau réfléchi, mais elles paraissent aussi au dehors, et deviennent semblables à celles que l'on observe dans le faisceau qui a passé par une ouverture étroite.

Ces phénomènes se produisent comme les précédents, avec la lumière blanche, et alors les franges sombres et brillantes se transforment aussi en franges colorées de diverses nuances; ils se produisent encore avec la lumière naturelle non concentrée au foyer d'une lentille; dans ce cas, les franges colorées dépendent particulièrement du degré de divergence des rayons incidents. La forme du miroir, sa grandeur, les courbures de son contour, et l'obliquité sous laquelle il reçoit la lumière, sont autant de circonstances qui influent sur le nombre, la forme et la disposition des franges. En choisissant un miroir de métal, nous avons réduit le phénomène à sa plus grande simplicité, car la première surface d'une glace étamée modifierait les résultats produits par la seconde.

Les franges produites par les bords des surfaces réfléchissantes ont été, je crois, observées et étudiées pour la première fois dans la série des expériences de diffraction que nous avons faites avec M. Biot. (Traité de physiq. de M. Biot, t. IV, supplément.)

Après avoir exposé d'une manière générale les quatre phénomènes fondamentaux de la diffraction, savoir, la production des franges par les bords des écrans, par les corps étroits, par les ouvertures étroites et par les bords des surfaces réfléchissantes, nous pouvons essayer de discuter les principes sur lesquels repose la théorie de la diffraction et sur lesquels repose en même temps le système des ondulations; cette importante discussion peut être réduite aux trois propositions suivantes:

1°. Sous certaines conditions les rayons lumineux exercent les uns sur les autres une action mutuelle.

2°. De cette action résulte rigoureusement le

principe des interférences, principe second, auquel semble soumis tous les phénomènes de l'optique.

3°. Le principe des interférences semble inévitablement conduire au système des ondulations.

De l'action mutuelle des rayons homogènes et du principe des interférences.

577. *Expériences de Grimaldi.* — Dans l'ouvrage de Grimaldi déjà cité, on trouve le passage suivant (*proposit.* 22, pag. 157) :

PROPOSITION : « Un corps actuellement éclairé peut devenir plus obscur, lorsqu'on ajoute une nouvelle lumière à celle qu'il reçoit déjà. Cette proposition est un paradoxe qui semblerait d'abord tout-à-fait improbable, car la propriété caractéristique de la lumière est d'éclairer les corps qu'elle frappe, et non de les obscurcir. Ce paradoxe est cependant une vérité certaine, à laquelle on peut donner le plus haut degré d'évidence par une expérience facile, bien qu'à ma connaissance elle n'ait été faite par personne. »

Voici une courte description de l'expérience de Grimaldi; elle prouve en effet sa proposition d'une manière décisive, et elle est, comme il le dit, tellement facile que tout le monde peut la faire.

La lumière solaire réfléchi horizontalement entre dans la chambre noire par deux petits trous ronds qui sont égaux, et assez éloignés l'un de l'autre pour que les deux faisceaux coniques ne commencent à se pénétrer qu'à une certaine distance. Un peu au delà du point où ils se pénétrant, on les reçoit perpendiculairement sur un tableau ou sur un carton blanc. Soit ABC (Fig. 600), le cercle produit par le premier, abc le cercle égal produit par le second, et arc le segment commun. Dans cet état, on observe : 1° que le segment commun arc est bien plus éclairé dans son intérieur que ne le sont les portions correspondantes, vers as ou vers bs , ou dans toute autre partie du contour où il n'y a pas superposition.

2°. Que les arcs abc et arc sont d'une obscurité remarquable, quoiqu'ils reçoivent beaucoup plus de lumière que le reste de la circonférence dont ils font partie.

Maintenant, si l'on ferme la première ouverture pour qu'elle n'envoie plus de lumière sur le segment arc du second cercle, les points situés en abc et en arc privés de cette lumière, reprennent un nouvel éclat. Il en est de même lorsqu'on ferme la seconde ouverture, en laissant ouverte la première, les points situés en abc et en arc privés de la lumière que leur envoyait la deuxième ouverture, deviennent beaucoup plus éclatants.

Donc, dans ces circonstances, de la lumière ajoutée à de la lumière, produit de l'obscurité; et réciproquement une surface obscure devient lumineuse, quand en lui ôte une partie de la lumière qui l'éclairait.

Les arcs abc et arc , présentent des tracts de co-

loration quand ils sont obscurs, c'est-à-dire quand ils sont éclairés par les deux ouvertures à la fois; ce phénomène de production de couleur n'avait pas échappé à la sagacité de Grimaldi.

578. *Expérience du docteur Young sur les franges produites par deux petites ouvertures.*

Quand la lumière solaire, après avoir traversé un verre celeré, entre dans la chambre noire par deux fentes étroites ou par deux ouvertures circulaires, plus petites et plus rapprochées que celles de l'expérience précédente, en reconnaît que les faisceaux en se pénétrant, produisent des franges alternativement sombres et brillantes (Fig. 601), tout-à-fait analogues aux franges produites par la diffraction. Mais si l'on ferme successivement l'une ou l'autre des ouvertures, les franges disparaissent, et, dans l'espace qu'elles occupaient, les alternatives de lumière et d'obscurité sont remplacées par une teinte lumineuse à peu près uniforme. Ainsi, en supprimant la lumière envoyée par l'une des ouvertures, on supprime l'obscurité qui se produisait entre les espaces brillants; donc cette obscurité résulte du concours de deux lumières qui viennent se rencontrer obliquement, l'une venant de la première ouverture, et l'autre de la deuxième.

Le docteur Young avait annoncé que dans cette expérience, les franges se propagent suivant des hyperboles (*A course of lectures on natural philosophy*, etc., London, 1807; t. 1, pag. 465; et explication des planches, pag. 787, fig. 442). Mais il paraît que dans aucune de ses recherches si remarquables sur l'optique, il n'avait constaté ce fait par des mesures directes.

579. *Expérience du docteur Young sur les franges intérieures produites dans l'ombre des corps défilés.*

Un petit faisceau de lumière blanche, réfléchi horizontalement par un miroir, pénètre dans la chambre noire par un trou percé avec la pointe d'une fine aiguille, dans une carte ou dans une feuille d'étain; à quelque distance de l'ouverture on place verticalement un fil ou une petite bande opaque rr' (Fig. 602), qui ait moins d'un millimètre de largeur (1/30 de ponce anglais). Les franges intérieures paraissent alors sur le tableau rr' ; celle du milieu est blanche, et de chaque côté on en compte trois rouges qui sont séparées par diverses nuances. Alors, si l'on place au devant de rr' un petit écran c pour arrêter seulement la lumière qui allait raser l'un des bords, toutes les franges intérieures disparaissent tant à droite qu'à gauche de la frange centrale blanche. (*A course of lectures*, etc., t. 2, pag. 639.)

Le même phénomène se produit en mettant l'écran à une petite distance derrière rr' , seulement il faut alors le plonger un peu dans l'ombre géométrique.

Avec la lumière simple, les franges sont alternativement sombres et brillantes, et l'interposition de l'écran près d'un seul des bords de rr' , fait

pareillement disparaître toutes les franges intérieures.

Donc ces franges sont produites par le concours des rayons qui rasent les deux bords du corps opaque, et par conséquent ces rayons de lumière exercent une action l'un sur l'autre.

580. *Expérience de M. Arago sur les modifications remarquables que les écrans transparents peuvent imprimer aux franges.*

Dans l'expérience précédente (Fig. 692), on substitue à l'écran c une lame de verre très mince et à faces parallèles; alors, suivant que cette lame est plus ou moins épaisse, on voit les franges éprouver des modifications différentes. Pour une certaine épaisseur, elles se déplacent d'un rang, c'est-à-dire que la frange centrale avance de a vers r' , et la première frange sombre de ce côté vient occuper la place qui était occupée par la seconde, celle-ci prend la place de la troisième, etc. : de l'autre côté de a c'est l'inverse; la troisième frange prend la place de la seconde, la seconde prend la place de la première, et celle-ci s'avance vers le lieu qui était occupé par la bande centrale. Pour une autre épaisseur de la lame transparente on peut plus grande que la première, le déplacement est de deux rangs, puis de trois, puis de quatre, etc.; enfin, pour des épaisseurs plus grandes, toutes les bandes intérieures sont déplacées et transportées hors de l'ombre géométrique; et là, sous certaines conditions, il est facile de les observer encore parmi les franges extérieures qui n'éprouvent que de légères modifications.

Il est bien entendu que, pour des épaisseurs comprises entre les précédentes, les déplacements sont compris entre ceux que nous avons indiqués, et dont nous avons parlé de préférence pour mieux fixer les idées. On obtient des effets analogues en mettant des lames transparentes de différentes épaisseurs devant chacun des bords du corps opaque; alors les déplacements ne sont plus produits par les épaisseurs absolues de ces lames, mais seulement par leurs différences. (*Ann. de physiq. et de chim.*, t. 1, pag. 199.)

Cette expérience de M. Arago est fondamentale; elle nous conduira plus tard à déterminer la vitesse de la lumière dans les différents milieux, et à reconnaître les effets des rayons diversement polarisés; mais, pour le moment, nous nous bornerons à en conclure, 1^o que les franges sont bien réellement produites par le concours des rayons venant des deux bords opposés; et 2^o que l'action mutuelle des rayons ne dépend pas seulement d'une modification particulière qu'ils éprouveraient aux limites des corps qu'ils rasent dans leur course, mais que cette action dépend aussi des divers milieux qu'ils ont traversés, depuis la source d'où ils émanent jusqu'au point où ils se rencontrent.

581. *Expérience de Fresnel sur les franges produites par la rencontre des rayons réfléchis.*

Deux miroirs métalliques plans sont disposés

verticalement à côté l'un de l'autre (à peu près comme les feuillets d'un livre ouvert), de manière qu'ils fassent entre eux un angle très obtus. (La figure 693 représente une coupe horizontale des miroirs et du faisceau de lumière qui sert à l'expérience.) Au devant de ces miroirs, une lentille d'un court foyer f concentre en r un faisceau de lumière homogène et dirigé horizontalement. Le cône divergent qui en résulte tombe en partie sur le miroir a et en partie sur le miroir a' ; les rayons, après s'être réfléchis, loin de l'intersection des miroirs, et loin de leurs bords, viennent se rencontrer dans l'espace, et là ils forment des franges alternativement sombres et brillantes, que l'on peut observer avec une loupe ou avec le micromètre précédemment décrit (Fig. 686 et 686 bis). Ces franges présentent les caractères suivants :

1^o. Elles sont parallèles à la commune intersection des miroirs;

2^o. Elles sont symétriques de part et d'autre du plan act , qui passe par cette intersection commune et par le milieu de la ligne rr' qui joint les images du point r sur chacun des miroirs; la frange centrale qui est sur ce plan est toujours une frange brillante.

3^o. Elles se propagent suivant des hyperboles, dont les foyers sont en r et r' , et dont le centre commun est en l .

4^o. Si l'on couvre l'un des miroirs, ou si l'on arrête avec un écran la lumière qui tombe sur sa surface, toutes les franges disparaissent.

5^o. Si le faisceau réfléchi par l'un des miroirs traverse une lame transparente à faces parallèles, soit avant, soit après la réflexion, toutes les franges sont déplacées, conformément aux lois découvertes par M. Arago (expérience précédente); lorsque chacun des faisceaux traverse une lame de même substance, ce n'est plus en raison des épaisseurs absolues, mais de la différence des épaisseurs de ces lames que le déplacement a lieu.

On peut dire que cette expérience porte au plus haut degré d'évidence la vérité fondamentale qu'il s'agit de démontrer ici, savoir : que deux rayons de lumière, émanés d'une même source, et qui se rencontrent sous une petite obliquité, exercent l'un sur l'autre une action mutuelle, de telle sorte qu'ils peuvent alternativement se détruire en totalité ou s'ajouter pour doubler leur éclat. Car le phénomène en se produisant par réflexion sur les miroirs se montre dans toute sa pureté et se trouve dégagé de toutes causes accidentelles. L'esprit le plus sévère et le plus difficile à convaincre ne peut plus recourir à des actions inconnues qui pouvaient être invoquées avec plus ou moins de raison dans les expériences précédentes : on pouvait supposer qu'en rasant les extrémités des corps la lumière éprouve des modifications particulières; et, de ce que ces modifications ne sont pas déterminées, on ne serait pas en droit de conclure absolument qu'elles ne peuvent pas produire les franges inté-

rieures et les autres effets observés. Mais dans l'expérience de Fresnel la lumière n'éprouve aucunement l'influence des bords; elle est réfléchie suivant les lois ordinaires, et c'est le concours de deux rayons simplement réfléchis qui produit alternativement une lumière double en éclat ou l'obscurité complète.

Cette vérité, soupçonnée par Grimaldi, admise et posée en principe par le docteur Young, se trouve désormais établie sur des bases solides par l'expérience de Fresnel et par celle de M. Arago. Nous allons maintenant montrer comment le principe des interférences s'en déduit d'une manière rigoureuse.

582. *Principe des interférences.* — Ce principe général peut être énoncé de la manière suivante :

Deux rayons homogènes, émanés d'une même source, ajoutent leur éclat quand ils se rencontrent sous une petite obliquité, après avoir par-

couru des chemins dont la différence est $0, \frac{2d}{2}$,

$\frac{4d}{2}, \frac{6d}{2}$, —, c'est-à-dire un nombre pair de demi-valeurs de d ; au contraire, ils se détruisent et produisent l'obscurité quand ils se rencontrent après avoir parcouru des chemins dont la différence est

$\frac{d}{2}, \frac{3d}{2}, \frac{5d}{2}$, —, —, —, etc., c'est-à-dire un nombre impair de demi-valeurs de d .

La valeur de d est un nombre différent pour les diverses couleurs, et même pour les diverses nuances du spectre. Voici le tableau des valeurs de d , déterminées par Fresnel avec le dernier degré d'exactitude, comme nous le verrons dans un instant.

Tableau des valeurs de d qui déterminent les périodes de duplication ou de destruction de lumière.

Limites des couleurs principales.	Valeurs extrêmes de d en millièmes de millimètre.	Couleurs principales.	Valeurs moyennes de d en millièmes de millim.
Violet extrême. . .	406	Violet. . .	423
Violet indigo. . .	439	Indigo. . .	449
Indigo bleu. . .	459	Bleu. . .	475
Bleu vert. . .	482	Vert. . .	521
Vert jaune. . .	532	Jaune. . .	551
Jaune orangé. . .	571	Orangé. . .	583
Orangé rouge. . .	596	Rouge. . .	620
Rouge extrême. . .	645		

Ainsi deux rayons appartenant au *rayon moyen*

du spectre se détruisent, et font du noir, quand ils se rencontrent, après avoir parcouru des chemins dont la différence est un nombre impair de

620
fois — ou 310 millièmes de millimètre; pour

2
deux rayons violets la différence des chemins parcourus doit être seulement un nombre impair de

423
fois — ou 212 millièmes de millimètre.

On remarquera peut-être que 312 ou même 310 millièmes de millimètre sont des valeurs si petites qu'elles semblent échapper à toute mesure et qu'il doit sans doute rester beaucoup d'incertitude sur leur détermination absolue; mais nous verrons bientôt que Newton était parvenu à mesurer ces longueurs, que Fresnel les a mesurées à son tour dans des phénomènes et par des moyens complètement différents, et qu'il existe un accord admirable entre les résultats de ces grands observateurs.

Ces valeurs de d , obtenues par des expériences et par des mesures directes, sont indépendantes de toute hypothèse sur le mode d'existence de la lumière; elles conviennent au système de l'émission et au système des ondulations, ou plutôt elles sont comme autant de conditions numériques auxquelles un système, quel qu'il soit, devra se soumettre. Elles sont le quadruple de ce qu'on nomme la *longueur des ondes* dans le système de l'émission, et elles sont ce que l'on appelle la *longueur des ondes* dans le système des ondulations. Pour s'exprimer rigoureusement, sans admettre aucun système, et sans sortir des voies expérimentales, il ne faudrait désigner ces valeurs de d , ni en les appelant des longueurs d'accès ni en les appelant des longueurs d'ondes; il faudrait leur donner un nom, qui ne contint ou ne supposât autre chose que le fait physique lui-même; on pourrait les appeler les longueurs des phases en des périodes de la lumière, car ces périodes sont un fait, et un fait indépendant de toute hypothèse. Cependant, pour ne pas compliquer le langage de la science par une innovation qui nous semble peu nécessaire, nous dirons que les valeurs de d représentent les longueurs des ondes ou des ondulations de la lumière, à peu près comme les nombres compris entre 32 pieds et 18 lignes représentent les longueurs des ondes sonores que notre oreille peut apprécier.

Reprenons maintenant l'expérience des miroirs de Fresnel, et essayons d'en déduire les preuves du principe que nous venons d'énoncer, et la détermination des longueurs des ondes.

Le point r (Fig. 693) était l'image du point r sur le premier miroir, ou $rp = pr$ et $cr = cr$.

Par la même raison, à l'égard du second miroir, on a $rp' = p' r'$ et $cr' = cr$.

Donc $cr = cr'$.

D'où il suit que la ligne cc' a tous ses points à égale distance des deux images r et r' .

Mais la lumière qui se réfléchit sur le premier miroir se trouve, pour sa direction et pour le chemin qu'elle fait, exactement comme si elle partait du point r ; celle qui se réfléchit sur le second miroir est exactement aussi comme si elle partait du point r' .

Donc tous les rayons tels que $r_1 a$ et $r_2 a$, qui viennent se rencontrer sur la ligne aa' , sont des rayons qui ont parcouru des chemins égaux; et réciproquement la ligne aa' étant à égale distance des points r et r' , se trouve être le lieu des rencontres de tous les rayons qui ont parcouru des chemins égaux. Or, comme il y a partout sur cette ligne une frange centrale brillante, ayant une fois autant d'éclat que la lumière réfléchie par un seul miroir, il en résulte que les rayons n'ont leur éclat lorsqu'ils se rencontrent après avoir parcouru des chemins égaux.

Considérons actuellement la première frange sombre, soit à droite, soit à gauche de la frange centrale, et joignons son milieu aux deux points r et r' qui sont censés être les deux points rayonnants. Il est évident que les rayons r et r' qui arrivent en ce point se rencontrent après avoir parcouru des chemins inégaux dont la différence est $sr - sr'$, pour la frange sombre de gauche, et $sr' - sr$ pour celle de droite. Donc on ne fait autre chose qu'exprimer un fait en disant : Les rayons se détruisent, quand ils se rencontrent après avoir parcouru des chemins dont la différence est $sr - sr'$. Or, Fresnel ayant déterminé les positions des points r et r' et mesuré exactement au moyen de son micromètre (Fig. 686 et 686 bis), la distance sa ou la demi-distance sa , il en a pu conclure aisément la différence des chemins parcourus; et c'est ainsi qu'il a constaté que les rayons des différentes couleurs se détruisent lorsqu'ils ont parcouru des chemins dont la différence est 310 millièmes de millimètre pour les rayons rouges et 212 millièmes pour les violets, etc., conformément au tableau précédent.

Fresnel a mesuré de même la distance $s'a'$ des franges sombres du deuxième ordre, puis celle des franges du troisième ordre, etc.; puis celle des franges brillantes du premier, du deuxième, du troisième ordre.... Comparaison faite de ces mesures, il en est résulté le principe fondamental que nous avons énoncé plus haut, savoir que les rayons s'ajoutent quand la différence de chemins parcourus

est 0, $\frac{3d}{2}$, $\frac{5d}{2}$, etc., et qu'ils se détruisent quand

cette différence est $\frac{d}{2}$, $\frac{3d}{2}$, $\frac{5d}{2}$, etc.

La marche hyperbolique des franges est une conséquence immédiate de ce principe; car il est facile de voir que la série des points pour lesquels la différence $sr - sr'$ des distances aux points r et r' reste constante forme une branche d'hyperbole ayant ses foyers en r et r' ; que la série des points

pour lesquels la différence $s'r - s'r'$ reste constante, forme une autre hyperbole ayant les mêmes foyers, de même pour la série des points dont la différence $s''r - s''r'$ reste constante, etc.

Fresnel n'a pas négligé de vérifier cette conséquence par un grand nombre de mesures prises à diverses distances des miroirs; ainsi, par son admirable sagacité, et par la précision scrupuleuse qu'il portait dans toutes ses recherches, il est parvenu à donner des preuves directes et irrévocables du principe de l'action mutuelle des rayons lumineux et des lois suivant lesquelles cette action s'exerce.

Le principe des interférences établi sur ces données n'est donc autre chose que l'expression d'un fait. On l'appelle principe des interférences parce que le Dr Young, qui en a le premier donné l'énoncé, disait qu'il y a *interférence* quand il y a action mutuelle de deux rayons, ou, ce qui revient au même, que deux rayons *interfèrent* quand ils agissent l'un sur l'autre. L'action mutuelle des rayons lumineux est, en effet, trop remarquable pour n'être pas désignée par un nom particulier, et tous les physiciens ont adopté l'expression du Dr Young. Il résulte de cette définition que, pour comprendre le principe des interférences dans toute son étendue et avec toute sa fécondité, il faudrait connaître tous les accidents et tous les modes qui peuvent se présenter dans l'action mutuelle des rayons. Nous aurons occasion de voir dans la suite que l'énoncé précédent n'est, à vrai dire, qu'un cas particulier du principe général de l'action mutuelle des rayons.

On conçoit maintenant pourquoi les franges disparaissent, lorsqu'on supprime la lumière réfléchie par l'un des miroirs; car il ne peut plus alors y avoir d'interférence: les rayons du miroir décomposé suivent leur route sans être partiellement détruits, et il en résulte une lumière de teinte uniforme dans toute l'étendue du faisceau réfléchi.

On conçoit pareillement pourquoi les franges sont déplacées par l'interposition d'une lame transparente dans le faisceau de l'un des miroirs; car, la vitesse de la lumière étant différente dans les différents milieux, les rayons ne mettent pas le même temps pour traverser l'épaisseur de la lame interposée et pour traverser une égale épaisseur d'air.

S'ils mettent plus de temps dans la lame, ils sont comme s'ils avaient plus de chemin à faire dans l'air. Il en résulte par conséquent une véritable inégalité dans les chemins parcourus, bien que les longueurs de ces chemins soient géométriquement égales. De là le déplacement des franges; et comme le sens de ce déplacement, dans l'expérience de M. Arago, annonce toujours un retard dans la lumière qui traverse la lame de verre, il en résulte d'une manière incontestable que la lumière se meut plus lentement dans le verre que dans l'air; ce qui semble en contradiction nécessaire, non-seulement avec la théorie actuelle de la réfraction dans le système de

l'émission, mais avec toutes les théories de réfraction auxquelles ce système pourrait conduire.

L'expérience des deux miroirs est sans contredit l'une des expériences les plus délicates de toute l'optique; l'angle qu'ils doivent faire entre eux est un angle très étroit, et il faut beaucoup de temps et d'adresse pour les ajuster convenablement et pour les ajuster d'une manière fixe. Lorsqu'il s'agit de prendre des mesures comme Fresnel est parvenu à le faire, il est presque indispensable d'employer un verre coloré plutôt que la lumière du spectre, car il serait à peu près impossible avec celle-ci d'avoir toujours la même nuance, et par conséquent la même longueur d'ondulation. Il importe aussi que la lentille qui concentre la lumière en y soit d'un très court foyer; car, si l'image solaire qu'elle donne avait une étendue sensible, chacun des points de cette image donnant un système de franges au lieu qui convient à sa position par rapport au miroir, il en résulterait une infinité de systèmes différents, placés à côté les uns des autres, et les franges noires des uns tombant sur les franges brillantes des autres, la lumière deviendrait sensiblement uniforme, ou du moins les franges noires deviendraient trop vagues et trop peu prononcées pour être mesurées avec exactitude.

Hypothèse des ondulations.

683. *Le fait des interférences ne suffit pas pour expliquer les phénomènes de diffraction.*

Quand un principe général est une fois établi, on peut s'en servir de bien des manières pour reculer les bornes de la science. On peut essayer de le développer, c'est-à-dire d'en tirer des phénomènes nouveaux ou de l'étendre à des phénomènes connus, dont la cause et les lois restaient indéterminées ou inconnues; on peut essayer aussi de le justifier, c'est-à-dire de remonter à une cause plus générale, dont il n'est qu'un mode ou un effet particulier. Or, si l'on essaie d'expliquer les phénomènes de diffraction, par le principe des interférences, on est immédiatement arrêté: on prouve bien, comme nous l'avons vu, que les franges intérieures, par exemple, résultent du concours de l'action mutuelle ou de l'interférence des rayons qui ont rasé chaque bord; mais d'où viennent ces rayons? et pourquoi se trouvent-ils dans l'ombre géométrique, où ils ne devraient jamais entrer si leur propagation se faisait en ligne droite? c'est ce que le principe des interférences n'explique pas. Sans doute, s'il y a des rayons dans l'ombre, et s'ils s'y trouvent dans un certain état et sous certaines conditions, ils doivent interférer et produire des franges, mais pourquoi y a-t-il des rayons? et pourquoi sont-ils soumis aux conditions d'interférence?

On peut supposer, comme l'avait fait le Dr Young, qu'aux bords du corps défilé il se fait une réflexion régulière ou irrégulière, et que les rayons qui en résultent viennent se propager dans l'ombre et in-

terférer; mais cette hypothèse ne peut se soutenir, car il en résulterait certainement que la nature des corps et l'état de leur surface aurait une influence ou sur la grandeur des franges, ou du moins sur leur intensité, et l'expérience prouve que cette influence est complètement nulle. D'ailleurs, et ceci est sans réplique, cette hypothèse est inconciliable avec les expériences de M. Arago, sur le déplacement des franges.

On pourrait supposer aussi que les bords des écrans, frappés par les rayons directs, deviennent lumineux, et que les rayons propres qu'ils émettent se propagent dans l'ombre, et produisent les franges par leur concours. Mais cette seconde hypothèse est détruite par les faits qui détruisent la première.

Ce que nous venons de dire des franges intérieures s'applique aux franges extérieures du bord des écrans et à celles qui sont produites par les biseaux des ouvertures étroites. Ces franges dépendent sans aucun doute d'une interférence des rayons; mais on ne peut soutenir ni que ces rayons sont réfléchis par les bords des écrans ou des biseaux, ni qu'ils sont produits par une excitation particulière des rayons directs sur la matière pondérable de ces corps.

Ainsi, jusqu'à présent, quelles que soient les hypothèses auxiliaires auxquelles on recourre, si l'en veut appliquer rigoureusement le principe des interférences, on reconnaît qu'il est insuffisant pour expliquer les phénomènes de diffraction.

Arrêtés de ce côté, nous pouvons tenter l'autre voie, et essayer de justifier ce principe, c'est-à-dire d'en chercher la cause dans la nature même de la lumière.

684. *Le fait des interférences est jusqu'à présent inconciliable avec le système de l'émission.*

Les physiciens sont unanimes sur ce point, que là où il y a lumière il y a mouvement; et le temps qu'il faut à la lumière pour venir du premier satellite de Jupiter jusqu'à la terre est une preuve assez frappante de cette vérité.

Entre toutes les variations que le mouvement peut présenter on distingue deux modes généraux essentiellement différents: le mouvement de translation et le mouvement de vibration. C'est ici que les opinions se partagent à l'égard de la lumière: les uns admettent qu'elle se propage par translation, et les autres qu'elle se propage par vibration. La première hypothèse constitue le système de l'émission, car la substance lumineuse serait alors émise sans retour et projetée par le soleil dans toutes les directions. La seconde hypothèse constitue le système des ondulations; car la substance lumineuse éprouverait alors des déplacements très petits, des mouvements alternatifs par lesquels elle serait successivement éloignée du corps lumineux dans un instant et rapprochée de la même quantité dans l'instant suivant, et les périodes d'allées et de

retours se répèteraient un grand nombre de fois dans un temps très court. Alors la substance lumineuse aurait une existence indépendante du corps lumineux, comme l'air a une existence indépendante des corps sonores; cette substance en repos ne serait pas de la lumière, pas plus que l'air en repos n'est du son. A cause de cette existence indépendante, et parce que de fait la lumière se propage dans toutes les directions, il en résulte que la substance lumineuse serait répandue d'une manière uniforme autour des corps lumineux. Par conséquent, ce qui serait vibration dans le corps deviendrait ondulation dans la substance lumineuse, c'est-à-dire que tous les points qui sont à la même distance d'un point donné dans le corps lumineux, éprouveraient à un instant donné, de la part de ce point, le même mouvement d'allée et de retour et avec la même intensité; c'est-à-dire, en d'autres termes, que, si l'on conçoit une infinité de lignes droites mathématiques qui divergent dans toutes les directions, à partir d'un point donné dans le corps lumineux, les vibrations qui s'exécuteront sur l'une de ces droites seront liées à celles qui s'exécutent au même instant sur une autre droite quelconque. C'est cette liaison qui constitue à proprement parler l'ondulation; car si les phénomènes de mouvement qui se produisent sur l'une de ces droites pouvaient être indépendants de ceux qui se produisent sur la droite voisine, les mouvements discordants et désordonnés qui en résulteraient ne seraient plus appelés des ondulations.

Voilà deux systèmes. C'est jusqu'à ce jour tout ce que l'on a pu imaginer de plus plausible. Or, si l'on ne peut affirmer sans réserve qu'entre les deux il y en a essentiellement un de vrai, on peut affirmer au moins qu'il y en a un qui ne l'est pas; c'est celui de l'émission.

Sans entrer ici dans une discussion complète, nous ferons remarquer seulement que personne jusqu'à ce jour n'a pu concilier ce système avec le principe des interférences, et rien en effet ne semble plus inconciliable. Deux molécules sont animées d'une même vitesse; elles vont dans le même sens, se rencontrent sous un petit angle et leurs vitesses se détruisent. N'y a-t-il pas contradiction, c'est-à-dire impossibilité mécanique?

Au contraire, dans le système des ondulations, le mouvement de la substance lumineuse étant alternativement dans un sens et dans l'autre, on voit que deux rayons doivent se détruire en se rencontrant, si, par une cause quelconque, ils arrivent au point de rencontre avec des vitesses opposées; c'est ce que nous allons examiner avec quelque détail.

685. *Le fait des interférences deviendrait une conséquence immédiate du système des ondulations.*

Concevons une ligne droite indéfinie ax (Figure 694), suivons laquelle se propage de la lumière simple d'une nuance quelconque. Admettre

que cette lumière se propage par ondulation dans une substance ou dans un fluide particulier que l'on appelle l'éther, c'est admettre que sur la ligne ax une molécule donnée d'éther reçoit successivement deux vitesses contraires : par exemple, des vitesses impulsives, qui la poussent dans le sens ax de la propagation, et ensuite des vitesses apulsives qui la rappellent dans le sens xa vers l'origine du mouvement que nous supposons quelque part à gauche du point a . Les vitesses impulsives passent nécessairement par divers degrés d'intensité, elles sont nulles d'abord, elles deviennent croissantes, atteignent un maximum, et décroissent ensuite jusqu'à redevenir zéro; il en est de même des vitesses apulsives, et l'on admet de plus que celles-ci passent exactement par les mêmes périodes que les premières. Par conséquent, si l'on considère au même instant toutes les molécules de la ligne ax , on en trouvera dans tous les états et avec tous les degrés possibles de vitesse. Au point x , par exemple, la vitesse sera nulle; puis les points précédents jusqu'au point a auront des vitesses impulsives, qui seront croissantes jusqu'en p , puis ensuite décroissantes; de a en c , les vitesses seront apulsives, ayant aussi leurs maximum au point p ; de c en a se recouvreront exactement les mêmes périodes, et ainsi de suite sur toute l'étendue de la ligne lumineuse. La longueur de la ligne xc sur laquelle se trouve une période complète des vitesses, dans leur ordre, est ce que l'on appelle la longueur de l'ondulation. C'est cette longueur qui est de 620 millièmes de millimètre pour les rayons rouges moyens, et de 423 millièmes seulement pour les violets. Ainsi, en suspendant par la pensée la course rapide d'un rayon lumineux, et en l'observant tel qu'il est à cet instant, l'on trouverait pour la lumière rouge un million d'ondulations dans la longueur de 620 millimètres ou un million d'espaces tel que ac , cx , etc.

Maintenant, pour mieux peindre aux yeux les divers états des molécules dans la longueur d'une ondulation, l'on peut, de chaque molécule, élever sur la ligne ax une perpendiculaire qui représente la grandeur de la vitesse correspondante, et comme la direction de cette vitesse est de a vers x , pour les points compris entre x et a , et au contraire de x vers a pour les points compris entre a et c , si l'on élève ces perpendiculaires au-dessus de ax pour le premier cas, et au-dessous pour le second : la ligne sinusoïdale $cnyax$, formée par les extrémités de ces perpendiculaires, pourra donner une juste idée de la direction et de la grandeur des vitesses. Les lignes courbes des vitesses, formées d'après ces principes et ces conventions, peuvent servir ainsi à caractériser les ondulations, et comme on peut concevoir une infinité de courbes différentes, passant par les points x , a et c , et remplissant les conditions voulues de grandeur et de symétrie, il est évident qu'il peut y avoir une infinité

d'ondulations différentes, ayant toutes la même longueur.

Après avoir reconnu l'état dans lequel se trouvent les divers points de la ligne lumineuse ax à un instant donné, nous devons examiner encore l'état d'un même point, considéré dans plusieurs instants consécutifs. Le point a , par exemple, est en repos, sa vitesse est nulle; mais, dans les instants suivants, toutes les vitesses qui affectent *présentement* les points précédents jusqu'à c viendront affecter *successivement* le point a . Ainsi, dire qu'une ondulation passe par un point donné, c'est dire que ce point reçoit successivement, et dans leur ordre, toutes les vitesses qui constituent l'ondulation.

Cela posé, considérons une onde ligne ax , (Fig. 695), et une autre ondulation identique à la précédente, qui se propage suivant cette ligne; supposons de plus que cette seconde ondulation se trouve d'accord avec la première, c'est-à-dire qu'à un instant donné, les points du repos et de mouvement se correspondent exactement. Il est clair que s'il y a ainsi accord parfait à un instant, cet accord se soutiendra toujours. Quand le point x sera en repos sur la première ligne, il sera en repos sur la seconde; quand il sera le maximum de vitesse impulsive sur la première, il aura le maximum de vitesse impulsive sur la seconde, etc. Or, si l'on pouvait, par un moyen quelconque, amener le rayon lumineux ax de la figure 695, en coïncidence avec le rayon ax de la figure 694, sans rien changer à l'accord où ils se trouvent, il est évident que toutes les vitesses seraient doublées par la superposition des petits mouvements, et que l'intensité de la lumière serait par conséquent doublée.

Le résultat serait le même encore si l'un des rayons était en retard ou en avance sur l'autre, d'une ou de plusieurs ondulations entières, ou, ce qui est la même chose, d'un nombre pair de demi-ondulations.

Et enfin il serait encore le même si les deux rayons, au lieu de se superposer, venaient seulement concourir au même point et se rencontrer sous une petite obliquité.

Donc, premièrement, deux rayons homogènes ajoutent leur éclat quand ils se rencontrent sous une petite obliquité et que l'un d'eux est, à l'égard de l'autre, en avance ou en retard, d'un nombre pair de demi-ondulations.

Mais si l'un des rayons est en retard sur l'autre d'une demi-ondulation, comme le rayon $a'x'$, (Fig. 696), à l'égard du rayon ax (Fig. 695), les phénomènes changent complètement d'apparence. Alors le point x , par exemple, (Fig. 695), correspond au point r' (Fig. 696). Le premier de ces points va être traversé par l'onde axc , et le deuxième par l'onde $r'a'u'$; ainsi l'un prendra des vitesses positives, tandis que l'autre recevra des vitesses négatives égales, et *vice versa*.

Par conséquent, si l'on suppose que les deux rayons ax et $a'x'$ soient amenés en coïncidence, les

vitesses se détruiront à chaque instant par leur superposition, et tous les points seront au repos; il n'y aura plus de mouvement et plus de lumière. Ainsi la coïncidence de deux rayons homogènes peut produire les ténèbres complètes.

Le résultat serait le même, si l'un des rayons était en retard ou en avance sur l'autre, d'un nombre impair quelconque de demi-ondulations.

Il serait le même encore si les rayons se rencontreraient sous une petite obliquité.

Donc, secondement, deux rayons homogènes se détruisent et produisent les ténèbres quand ils se rencontrent sous une petite obliquité, et que l'un est à l'égard de l'autre en retard ou en avance d'un nombre impair de demi-ondulations.

C'est ainsi que le principe des interférences devient une conséquence nécessaire du système des ondulations. En se reportant maintenant à l'expérience des miroirs (581), on pourra facilement en faire l'analyse, et reconnaître que l'inégalité des chemins parcourus par les rayons qui viennent former les franges sombres et brillantes produit un retard d'un nombre impair de demi-ondulations dans le premier cas, et d'un nombre pair dans le second.

586. *Origine du système des ondulations, et conséquences générales auxquelles il conduit.*

Les philosophes de l'antiquité ne connaissaient sur la lumière qu'un petit nombre de phénomènes qui avaient été observés avec peu de soin et vaguement définis; cependant leurs ouvrages contiennent les premiers germes du système de l'émission et du système des ondulations. Tant il est vrai que l'esprit humain semble condamné à admettre l'un ou l'autre de ces systèmes, faute de pouvoir imaginer autre chose. Ces opinions contraires se sont transmises d'âge en âge, jusqu'à la naissance des sciences, c'est-à-dire jusqu'au temps de Kepler, de Galilée, de Descartes et de Grimaldi, sans rien perdre de l'obscurité qui les enveloppait. Alors, de rapides découvertes sur la lumière et la chaleur, sur le magnétisme et l'électricité, semblaient promettre une prompt solution de toutes les questions fondamentales sur le mode d'existence des forces naturelles. Mais ces questions destinées à tourmenter sans cesse les esprits vulgaires doivent occuper long-temps encore les esprits les plus élevés; et dans l'impossibilité d'en donner des solutions, même après les grandes découvertes qui ont illustré notre époque, nous sommes réduits à retracer les efforts plus ou moins heureux qui ont été faits pour les résoudre.

Le père Grimaldi paraît être le premier qui ait essayé d'expliquer logiquement les phénomènes de l'optique par le système des ondulations. Ses raisonnements supposent une prodigieuse sagacité, et une connaissance approfondie des lois de la mécanique. On peut juger par son ouvrage qu'il s'était ouvert des routes nouvelles dans l'étude de la physique; mais il fut enlevé aux sciences à l'âge de quarante-quatre ans.

A peu près à la même époque, Robert Hooke, cet esprit si fécond, si original et si hardi, avait expliqué plusieurs phénomènes par les ondulations, et particulièrement celui des anneaux colorés ou des lames minces, dont nous devons nous occuper un peu plus loin.

Huyghens avait adopté aussi le système des ondulations ; il en avait posé les principes mathématiques avec cette supériorité de génie qui caractérise tous ses ouvrages, et la loi fondamentale de la double réfraction, à laquelle il fut conduit par cette voie, est, comme nous le verrons plus tard, une découverte du premier ordre.

Plusieurs autres grands mathématiciens, comme Descartes et Euler, admettaient le système des ondulations ; mais on ne trouve dans leurs ouvrages aucune découverte théorique ou expérimentale qui puisse devenir un argument direct en faveur de ce système : il est même remarquable que les idées *a priori* qui conduisirent Descartes à la découverte de la loi de réfraction ne paraissent pas rentrer dans l'hypothèse des ondes.

Le Dr Young a découvert le principe des interférences ; il y fut conduit, à ce qu'il paraît, par ses recherches sur le son ; après en avoir donné l'énoncé en 1801 (*Cours de lectures, etc.*, t. 2, pag. 624), il parvint à le fortifier par quelques expériences en 1802 (*id.*, pag. 633) ; et c'est seulement en 1803 (*id.*, pag. 639), qu'il fit l'expérience décisive que nous avons rapportée (579).

Fresnel a fondé le système des ondulations sur des bases solides, et par ses découvertes expérimentales et par ses recherches théoriques. Nous verrons dans ce qui nous reste à dire sur l'optique, que parmi les grands observateurs qui l'ont précédé dans l'étude des phénomènes de la lumière, on n'en peut citer aucun qui ait su porter plus d'invention dans ses expériences, plus de précision dans ses mesures et plus de profondeur dans ses déductions. L'histoire des sciences placera le nom de Fresnel parmi les noms les plus illustres.

Après avoir rappelé en peu de mots les efforts long-temps incertains par lesquels on est parvenu au système des ondulations, il est nécessaire d'indiquer ici quelques-unes des conséquences générales auxquelles il conduit.

Dans les phénomènes de la lumière comme dans les phénomènes du son, il faut distinguer l'impression reçue par nos organes et la cause physique de ces impressions. Ces deux choses distinctes sont en général confondues : quand on dit, par exemple, que le son existe pour les sourds, et la lumière pour les aveugles, on n'exprime en réalité qu'un fait physique incontestable ; et cependant on a l'air de rechercher une expression paradoxale, parce que dans le langage ordinaire, ces mots, son et lumière, désignent seulement la perception du son et de la lumière. Dans le langage de la science, le son est une vibration de la matière pondérable, et la lumière une vibration dans l'éther, qui est une sub-

stance impondérable. Ainsi, la lumière existe hors de nous ; nous pouvons la concevoir dans l'espace ; nous pouvons la peindre à l'esprit ; c'est un mouvement soumis à certaines conditions. Cela posé, il est évident que partout où il y a de la lumière, il y a de l'éther ; donc l'éther remplit l'espace. Il se trouve entre le soleil et la terre, entre tous les corps de notre système planétaire, et dans l'espace indéfini qui nous sépare des étoiles les plus éloignées ; car il n'y a pas un point de cette immense étendue qui ne soit à chaque instant traversé par d'innombrables rayons de lumière. Et, ce n'est pas seulement dans le vide des cieux, que l'éther est répandu, mais il pénètre dans tous les corps, il remplit tous les intervalles que laissent entre eux les atomes pondérables. Si l'éther n'existait pas dans toute l'étendue de l'atmosphère, la lumière des astres n'arriverait pas jusqu'à nous ; s'il n'existait pas dans l'eau, le verre, le diamant, et tous les corps diaphanes, ces corps ne se laisseraient pas traverser par les ondes lumineuses ; enfin s'il n'existait pas dans les intervalles qui séparent les atomes de notre enveloppe matérielle, la lumière ne pourrait pas nous affecter, les ondulations ne passeraient pas dans les humeurs de l'œil et jusqu'aux fibres nerveuses de la rétine, dernier terme visible de notre raison puisse les suivre. Les corps opaques eux-mêmes sont remplis d'éther, car ils deviennent transparents lorsqu'ils ont une ténuité suffisante.

Ainsi, le système des ondulations nous conduit à admettre l'existence d'une matière, ou plutôt d'une substance, au sein de laquelle se trouvent dispersés, suivant des lois éternelles, les divers fragmens de matière pondérable, qui constituent les planètes et les astres.

Cependant si l'éther est partout, il n'est pas partout identique à lui-même. Il est probable que dans le vide des espaces célestes, comme dans le vide artificiel produit par nos machines, il n'y a nulle différence dans la distribution de cette substance, et par conséquent nulle différence dans la marche de la lumière. Mais dans l'intérieur des corps, la lumière se meut diversement, les ondulations changent de vitesse et de longueur, par conséquent l'éther prend des élasticités différentes. Nous verrons même, par les expériences de polarisation, que dans la plupart des corps cristallins, son élasticité n'est pas la même dans tous les sens.

Après avoir développé les notions fondamentales du système des ondulations plus longuement peut-être que les bornes de cet ouvrage ne devaient le permettre, il est temps d'arriver aux applications que l'on en peut faire pour expliquer les phénomènes de la diffraction et beaucoup d'autres phénomènes qui dépendent des interférences.

Explication des phénomènes de diffraction.

687. *Franges extérieures produites par le bord d'un écran.* — Pour expliquer la cause des franges diffractées, et de toutes les lois qu'elles présen-

tent, Fresnel admet le principe suivant : « Les vibrations d'une onde lumineuse dans chacun de ses points peuvent être regardées comme la somme des mouvements élémentaires qu'y exercent au même instant, ou agissant isolément, toutes les parties de cette onde considérée dans une quelconque de ses positions antérieures. »

Ainsi, le point r (Fig. 697) étant un point lumineux, ou le foyer d'un faisceau de lumière simple, et le cercle amc représentant une portion de l'une des ondes envoyées par ce point lumineux, la vitesse qui se produira en un point quelconque r , lorsque cette portion de l'onde y passera, sera la même que la vitesse qui serait produite en ce point par la résultante de toutes les actions que les divers éléments de l'onde amc pourraient exercer sur lui, en les considérant comme autant de centres d'ébranlement ou de points lumineux particuliers. Il arrive même que dans la composition des mouvements élémentaires envoyés en r par les diverses parties de l'onde amc , l'on ne doit tenir compte que des parties qui avoisinent le point x situé sur la ligne rx , et négliger complètement celles qui en sont assez éloignées pour que les lignes correspondantes, telles que mr , or , aient une inclinaison sensible, parce que leurs actions deviennent contraires et se détruisent mutuellement. En effet, prenons par exemple, ces trois points, a , m , c , de manière que $ar = mr$ soit égal à $mr = cr$ et égal à une demi-ondulation; à cause de l'obliquité de ces lignes, et de leur longueur qui est comme infini par rapport à la longueur si petite d'une demi-ondulation, il est clair que les arcs très petits ma et mc seront égaux entre eux; or, les ondulations qui arriveraient en r suivant ar et suivant mr , étant en discordance, c'est-à-dire en différence d'une demi-ondulation, se détruiraient; pareillement, les ondes qui partiraient de tous les points compris entre m et c , étant en discordance avec celles qui partiraient des points correspondants compris entre m et a , il y aurait destruction complète puisque $am = mc$. Donc la résultante des actions de l'onde amc sur le point r ne dépend que des actions produites par les divers points de cette onde qui sont à une petite distance du point x . Ce que nous disons du point r s'applique au point r' et à tout autre point quelconque; c'est-à-dire que la résultante des actions que les divers points d'une onde exercent sur un point donné dépend seulement des actions produites par les points de cette onde qui se trouvent à une petite distance de la ligne menée du point lumineux au point donné. Quand l'onde se propage librement, toutes ces résultantes sont égales pour des points qui sont à la même distance du point lumineux, et la lumière est uniforme.

Mais quand l'onde amc rencontre un obstacle, par exemple, un écran ax (Fig. 698), la portion mc étant arrêtée, la résultante des actions qui s'exercent au point r est seulement produite par les divers

points de la portion ax de l'onde qui reste libre. Par conséquent, pour connaître l'influence d'un écran, il faut savoir calculer la résultante des actions que les divers points de la partie libre de l'onde peuvent exercer sur un point donné.

Or, si ce point est en r' par exemple, de telle sorte que la ligne $r'r'$ vienne percer la surface de l'onde amc en un point x' un peu éloigné du bord a de l'écran, il suit de ce que nous venons de voir que la résultante étant seulement dépendante des points qui avoisinent le point x' et tout-à-fait indépendante des points éloignés comme a et c , l'éclat de la lumière reçue en r' ne sera modifiée en rien par la présence de l'écran. Voilà pourquoi les franges diffractées ne s'étendent jamais qu'à une petite distance angulaire du bord de l'écran.

Mais si le point donné est en r'' de manière que $r'r''$ perce l'onde en un point x'' assez voisin de a pour que l'action exercée suivant $r'r''$ ne puisse être négligée, alors la lumière qui arrive en ce point r'' est modifiée par la présence de l'écran.

Nous allons essayer de faire comprendre le principe de ces modifications et la cause des alternatives d'ombre et de lumière qu'elles produisent. Pour simplifier les idées, nous raisonnerons seulement sur ce qui arrive dans le plan de la figure; il est facile de voir que tout sera pareil dans les plans voisins de celui-ci, soit que le foyer r provienne d'une lentille cylindrique parallèle au bord de l'écran, soit qu'il provienne d'une lentille sphérique.

Soit r le point lumineux (Fig. 699), et amc la portion d'une onde qui se propage vers le point r . Menons la ligne rx , et séparons par la pensée les effets produits sur le point r par les deux portions ax et xc de l'onde amc , ces portions étant assez étendues pour couvrir tous les points de l'onde qui peuvent transmettre en r des actions sensibles; car, d'après ce qui précède, nous pouvons négliger tout ce qui est à une distance un peu grande du point x . Tout étant symétrique de chaque côté de rx , il est évident que la somme des actions produites en r par ax sera identique à la somme des actions produites au même point par xc , et que si l'on représente par 1 l'éclat ou l'intensité de lumière qui résulte des premières, 1 sera aussi l'éclat qui résulte des secondes, et par conséquent 2 sera l'éclat ou l'intensité de lumière que doit posséder le point r quand il reçoit platement et sans obstacle la somme des actions que tous les points efficaces de l'onde amc peuvent exercer sur lui.

Du point r comme centre, et d'un rayon rx , décrivons un arc de cercle et traçons les lignes rb , ra , rb' , ra' , etc.; de telle sorte que leurs parties ab , ar , $b'r$, $a'r$, etc., comprises entre les arcs ac et ax soient respectivement égales, la première à une demi-ondulation, la deuxième à deux demi-ondulations, la troisième à trois demi-ondulations,

quels la ligne brisée qui arrive au point lumineux en rasant le bord de l'écran surpasse d'un nombre pair de demi-ondulations, la ligne droite qui arrive directement au point lumineux, la trace de tous ces points forme donc la trace de toutes les franges sombres ;

Celle du premier ordre correspondant à $2/2$ ondulat.
Celle du second ordre. à $4/2$
Celle du troisième ordre. à $6/2$
.
.

Nous pouvons conclure de là que les traces de ces franges forment des hyperboles et non des lignes droites; qu'elles sont plus serrées dans la lumière violette que dans la lumière rouge; enfin que leur distance à l'ombre géométrique change avec la distance du point lumineux à l'écran, et avec celle du tableau sur lequel on les reçoit.

Voilà donc le vrai principe des franges rendu sensible par le raisonnement et sans le secours du calcul.

Cependant, pour porter dans ses conclusions le dernier degré d'exactitude, Fresnel a déterminé, par l'analyse, les positions des maxima et des minima d'intensité de lumière, dont nous venons d'indiquer approximativement l'existence. Les résultats auxquels il est parvenu sont rassemblés dans le tableau suivant.

Tableau du maximum et du minimum pour les franges extérieures et des intensités de lumière correspondantes.

	Valeurs de α .	Intensité de lumière.
Premier maximum	1,217. . . .	2,741
Premier minimum	1,873. . . .	1,557
Deuxième max.	2,345. . . .	2,399
Deuxième min. . . .	2,739. . . .	1,687
Troisième max.	3,082. . . .	2,302
Troisième. min. . . .	3,391. . . .	1,744
Quatrième max.	3,674. . . .	2,252
Quatrième min. . . .	3,937. . . .	1,778
Cinquième max.	4,183. . . .	2,221
Cinquième min. . . .	4,416. . . .	1,801
Sixième max.	4,637. . . .	2,199
Sixième min. . . .	4,848. . . .	1,819
Septième max.	5,050. . . .	2,182
Septième min. . . .	5,244. . . .	1,832

Ainsi en représentant par α l'intensité de la lumière que recevrait un point sans la présence de l'écran, on voit, dans ce tableau, la série des intensités alternatives qu'il prendra lorsqu'il sera placé sous l'influence de l'écran à diverses distances de l'ombre géométrique.

An premier maximum, c'est-à-dire au point le plus éclatant de la première frange brillante, l'intensité est presque 2 plus $3/4$, ou à peu près une fois et demie ce qu'elle serait sans l'écran.

Au premier minimum, c'est-à-dire au point la

plus sombre de la première frange sombre, l'intensité n'est qu'environ 1 et $1/2$ en à peu près les $3/4$ de ce qu'elle serait sans l'écran; puis les maxima suivans diminuent graduellement tandis que les minima augmentent de telle sorte qu'au septième ordre le maximum ne surpasse pas de 2 dixièmes la lumière directe α , et le minimum lui est à peine inférieur de la même quantité; c'est ainsi que les alternatives s'effacent et viennent se confondre dans la lumière uniforme.

La première frange sombre est bien loin d'être ici complètement noire, comme elle est dans l'expérience des miroirs; on peut même remarquer que l'intensité de la lumière qu'elle reçoit est plus grande que 1, ce qui prouve bien que la portion de l'onde comprise entre r et le bord de l'écran (Fig 699) contribue, comme nous l'avons remarqué, à augmenter l'effet de la portion de l'onde qui est à gauche de r .

Les valeurs de α , contenues dans la seconde colonne du tableau précédent et correspondantes aux divers maxima et minima en aux diverses franges brillantes et sombres, sont telles qu'en les substituant dans l'équation.

$$x = \sqrt{\frac{(a+b)bd}{2a}}$$

on obtient pour x une valeur qui exprime la distance qui existe entre le milieu de la frange correspondante et la ligne de l'ombre géométrique;

a est la distance du bord de l'écran au point lumineux, b la distance du même bord au tableau sur lequel on reçoit la frange;

d est la longueur de l'ondulation pour l'espèce de lumière qui est soumise à l'expérience.

Il serait facile, d'après cette formule, de tracer la courbe hyperbolique que suit une frange donnée lorsqu'en connaît a et d .

Nous avons considéré l'effet d'un seul point lumineux; mais il serait facile d'analyser les phénomènes plus complexes qui se produiront lorsqu'un nombre quelconque de points voisins viendront concourir au résultat; car chacun d'eux, agissant comme s'il était seul, donnera naissance à un système particulier de franges, et il suffira de voir comment ces systèmes se croisent ou se superposent pour prendre une juste idée de l'effet résultant.

Si la lumière incidente était de la lumière solaire directe, on aurait $a = \infty$, et la formule précédente deviendrait.

$$x = \sqrt{\frac{bd}{2}}$$

Ces valeurs de x se rapportent alors à autant d'ombres géométriques différentes qu'il y a de directions différentes dans les rayons incidents; et si l'on veut s'arrêter seulement aux rayons extrêmes qui font entre eux un angle d'environ 30° à 32° , il sera facile de tracer les systèmes de franges corres-

pondans et de voir comment les systèmes intermédiaires viennent empiéter sur ceux-ci.

Pour la lumière blanche toutes les franges deviendront colorées, et d'après ce qui précède il ne sera pas difficile de tracer les limites des diverses couleurs, ni de déterminer quelles sont les intensités des nuances diverses qui viennent se superposer en un point donné.

688. *Franges intérieures, produites dans l'ombre des corps déliés, ou des écrans étroits.* Soit $11'$ (Fig. 700) la largeur d'un écran ou d'un corps très délié, comme un fil ou un cheveu, r le foyer d'une lentille sphérique, ou d'une lentille cylindrique dont l'axe est parallèle à la longueur de l'écran; a $11'$ a' l'onde incidente, que nous supposons appartenir à la lumière rouge homogène, dont la longueur d'ondulation est 630 millièmes de millimètre; rr' le tableau ou le verre dépoli sur lequel on reçoit l'ombre de l'écran; a a' la largeur de l'ombre géométrique; et r un point quelconque situé dans cette ombre, dont l'axe est suivant la ligne $r'x$.

Pour rendre l'explication sensible, il a été nécessaire d'exagérer singulièrement la largeur de l'écran, qui n'est en réalité que de 1 ou 2 millimètres, et de réduire au contraire dans une grande proportion les distances de l'écran au point lumineux et au tableau, qui peuvent être en général de plusieurs mètres.

Sur le cercle a $11'$ a' , qui représente l'onde incidente, on prend à gauche de r 1 des points, e , b , c , d , etc., tels qu'en les joignant au point r , la différence de deux de ces lignes consécutives soit égale à la demi-longueur d'une ondulation, ou à 310 millièmes de millimètre, en supposant, comme nous l'avons fait, que l'on opère sur de la lumière rouge. Ainsi

$$ra - r1 = 310 \text{ millièmes de millimètre.}$$

$$rb - ra = 310 \text{ id.}$$

$$rc - rb = 310 \text{ id.}$$

A droite de r 1 , on prend pareillement des points a' , b , c , etc., qui remplissent la même condition, et qui donnent aussi

$$ra' - r1' = 310 \text{ millièmes de millimètre.}$$

$$rb' - ra' = 310 \text{ id.}$$

$$rc' - rb' = 310 \text{ id.}$$

Cela posé, pour connaître la quantité de lumière qui arrive au point r , il suffit de remarquer qu'elle résulte des quantités partielles envoyées par la portion $1a$ de l'onde incidente, et par la portion $1'a'$, car chacune de ces portions de l'onde éclaire le point r dans un certain degré, qui dépend des distances $r1$ et $r1'$, et de l'obliquité de ces lignes sur la ligne rr , qui va au point lumineux. Or, la lumière que $1a$ peut envoyer au point r dépend elle-même des rapports de grandeur des arcs $1a$, eb , bc , etc. En effet, nous avons vu précédemment que les divers points de ces arcs peuvent être considérés comme des centres d'ébranlement qui propagent des ondes vers le point r . Ainsi, la distance r a surpassant la distance $r1$ d'une demi-ondulation,

les ondes envoyées par les deux points a et 1 arrivent en r dans un état de discordance complète, et elles se détruisent exactement si elles avaient la même intensité. Ce qui arrive pour ces deux points arriverait pour tous les points de l'arc $1a$, si l'on avait $1a = eb$, car chacun des points de $1a$ aurait alors sur ab un point correspondant avec lequel il serait en discordance complète; les deux arcs pris ensemble ne produiraient aucun effet, et par conséquent aucune lumière au point r ; il en serait de même de l'arc bc considéré avec l'arc suivant, etc.

Mais les arcs $1a$ et ab sont essentiellement inégaux, et, de plus l'intensité des ébranlements que leurs divers points peuvent exciter en r est différente à raison de leur inclinaison croissante sur la ligne rr . Il en résulte donc que ces deux arcs pris ensemble envoient de la lumière au point r , qu'il en est de même des deux suivants, et de même encore des deux suivants, jusqu'à ce que l'on arrive à un groupe de deux arcs pour lesquels les lignes menées au point r , soient tellement inclinées sur rr que l'on puisse considérer comme tout-à-fait nulles les différences des ébranlements qui arrivent dans ces directions.

On peut essayer de déterminer par le calcul l'intensité et la direction de celle résultante de tous les ébranlements partiels que les divers points de l'onde $1a$ envoient au point r ; mais jusqu'à présent la théorie n'a pas appris à résoudre cette question d'une manière générale, et d'ailleurs nous devons nous borner ici à faire remarquer que l'arc $1a$ est celui de tous qui produit le plus grand effet sur le point r , parce qu'il agit de plus près et sous la moindre obliquité. Ainsi la résultante aura, dans tous les cas, une direction, telle que rr , plus ou moins rapprochée de $r1$ (1). Mais cette direction changera par deux causes : 1^o la distance du point lumineux à l'écran restant la même, la résultante s'éloignera d'autant plus de $r1$ que le point r s'approchera davantage du bord de l'ombre géométrique du côté de a , parce que les lignes ra , rb devenant moins obliques, les ébranlements qui arrivent au point r suivant les lignes prennent plus d'intensité; 2^o le point r restant le même, si le point lumineux se rapproche ou s'éloigne de l'écran $11'$, le cercle qui représentera l'onde incidente, et qui passe toujours par les points 1 et $1'$, sera en dedans ou en dehors du cercle $1a$, et cette circon-

[1] Nous devons rappeler que notre but est seulement de donner ici une idée de la cause qui produit les phénomènes de diffraction. Nous ne tenons aucun compte de la portion de l'onde $1a$ qui est arrêtée par l'écran, et cependant il faudrait en tenir compte, car elle pourrait être telle que le nombre des actions qu'elle exerce en r fût égale à l'action de la moitié entière de l'onde, et dans ce cas la résultante des arcs $1a$, eb , bc , etc., serait nulle, et ce serait de $1a$ si l'arc $1a$ était un peu plus large ou un peu plus étroit. Beaucoup d'autres considérations encore devraient entrer en jeu dans la théorie de la diffraction; c'est un sujet qui dans un état présent doit être considéré comme l'un des plus féconds pour les recherches expérimentales et surtout pour les applications de l'analyse mathématique.

stance changeant la disposition des points a, b, c , etc. et l'obliquité des lignes menées de ces points au point r , il est évident que la direction de la résultante rr' des ébranlements qu'ils excitent en ce point sera elle-même changée, et d'autant plus rapprochée de rl que le point lumineux sera plus près de l'écran.

Ainsi, en dernier résultat, la lumière que la portion LA de l'onde envoie au point r dépend de la largeur de l'écran, de sa distance au point lumineux, et de la position de ce point r dans l'ombre géométrique.

Ce que nous venons de dire de la portion LA de l'onde s'applique à la portion $L'A'$, qui donne donc aussi au point r une résultante $r'r'$ dont la direction est plus ou moins rapprochée de rl' . Mais, pour une même distance du point lumineux à l'écran, on voit que cette résultante se rapproche de rl à mesure que le point r se rapproche du bord b de l'ombre géométrique, et par conséquent à mesure que la résultante de LA s'éloigne de rl ; et réciproquement la résultante $r'r'$ s'éloigne de rl' à mesure que le point r s'approche du bord b' de l'ombre géométrique, et par conséquent à mesure que la résultante rr' se rapproche de rl .

Ces deux résultantes rr' et $r'r'$ déterminent l'éclat de la lumière ou l'obscurité qui doit paraître au point r ; toutes les fois qu'elles seront concordantes, il y aura lumière, et il y aura ténèbres toutes les fois qu'elles seront discordantes. Le premier cas arrivera quand la différence des chemins parcourus rr' et $r'r'$ sera nulle ou égale à un nombre pair de demi-ondulations, et le second cas arrivera quand cette même différence sera égale à un nombre impair de demi-ondulations.

Pour tous les points qui sont situés sur l'axe de l'ombre géométrique lax , la différence des chemins parcourus sera toujours nulle quand la ligne LA sera perpendiculaire à la ligne rl , parce qu'alors tout sera symétrique de part et d'autre. Ainsi, dans ce cas, le centre même de l'ombre sera toujours une frange brillante.

En s'écartant de l'axe, sur le tableau rr' , le point r arrivera bientôt dans une position pour laquelle la différence des lignes rr' et $r'r'$ sera égale à une demi-ondulation ou à 310 millièmes de millimètre, si l'on opère sur la lumière rouge; alors il y aura discordance complète, et par conséquent obscurité; ce phénomène se produira à la même distance à droite et à gauche de la frange brillante du centre, et les deux franges sombres qui en résulteront formeront le système des franges sombres du premier ordre.

En continuant de s'écarter de part et d'autre de l'axe, sur le tableau rr' , le point r passera successivement par des positions pour lesquelles la différence des chemins parcourus rr' et $r'r'$ sera deux demi-ondulations, ce qui donnera les franges brillantes du deuxième ordre, puis trois demi-ondulations, franges sombres du deuxième ordre,

puis quatre demi-ondulations, franges brillantes du troisième ordre, puis cinq demi-ondulations, franges sombres du troisième ordre, etc.

On ne doit pas perdre de vue que, pour une même position du point lumineux de l'écran et du tableau, les résultantes rr' et $r'r'$ changent un peu de direction, comme nous l'avons vu, à mesure que le point r s'écarte de l'axe dans un sens ou dans l'autre, et c'est là ce qui nous empêche d'indiquer le lieu précis des franges sombres ou brillantes des divers ordres, et leurs distances mutuelles. Mais Fresnel est parvenu à déterminer ces positions par le calcul, et les expériences qu'il a faites ensuite ont pleinement confirmé sa méthode de calcul.

Fresnel a pareillement donné une formule pour résoudre la question suivante : quelles relations doivent exister entre les largeurs de deux écrans, entre leurs distances au point lumineux et leurs distances au tableau pour qu'ils produisent des franges égales.

Soit L la largeur du premier écran,
 r sa distance au point lumineux,
 r' sa distance au tableau.

Soient L' , r' , les quantités analogues pour le second écran; les franges seront égales quand ces quantités remplissent les deux conditions suivantes :

$$r'L = r'L' \\ rr'L + r'r'L = rr'L' + r'r'L'$$

Il est facile de voir, d'après ces conditions, que si l'on a $L = L'$, c'est-à-dire un même écran pour les deux expériences, il faut nécessairement que l'on ait aussi $r = r'$ et $r = r'$, et réciproquement. Ainsi, avec un même écran on ne peut pas produire deux systèmes de franges identiques en faisant varier la distance du point lumineux et celle du tableau.

Si la largeur de l'un des écrans était double de celle de l'autre; si l'en avait, par exemple, $L = 2L'$, en en déduirait d'abord $r = 2r'$, c'est-à-dire que, pour avoir des franges égales, il faudrait porter le tableau à une distance double derrière l'écran, qui est double; on trouve en même temps que, devant l'écran le plus étroit, la distance du point lumineux doit être au plus un quart de la distance du point lumineux devant l'écran le plus large.

Il est facile de voir, par la discussion précédente, 1° que les franges augmentent de largeur et de distance à mesure que l'on éloigne le tableau derrière l'écran; mais cette augmentation n'est pas tout-à-fait proportionnelle à la distance; 2° qu'elles augmentent de largeur à mesure que l'on augmente la distance du point lumineux à l'écran; 3° qu'elles augmentent pareillement de largeur quand l'écran devient plus étroit.

Ces conséquences peuvent être facilement vérifiées par l'expérience, et pour rendre plus frappante la vérification de la dernière, il suffit, par exemple, de présenter parallèlement à l'image d'une lentille cylindrique, et à une distance convenable, un corps

effilé en pointe comme une aiguille ou comme un triangle très allongé, et de recevoir son ombre sur le tableau; on pourra reconnaître alors que l'ombre de la pointe donne des franges larges et très distantes, tandis que celle de la base présente des franges si nombreuses et si serrées qu'il devient souvent difficile de les apercevoir, même avec une loupe.

Lorsque l'écran est incliné, comme on le voit (Fig. 701), où $l'l'$ représente l'écran, et r le point lumineux, il arrive toujours que les franges cessent d'être symétriques de part et d'autre du milieu de l'ombre, et que la frange centrale brillante suit une ligne courbe. Pour se rendre compte de ce phénomène, il suffit de remarquer que la lumière qui vient dans l'ombre est alors la résultante des ébranlements excités par les deux portions lA et $l'A'$ de l'onde incidente. La résultante de lA sur le point r , par exemple, sera, comme nous l'avons vu, très voisine de rL , et celle de $l'A'$ très voisine de $r'L'$. Or, les ébranlements excités par les diverses portions d'une onde se propagent avec la même vitesse que l'onde elle-même, il est évident que la frange centrale brillante sera placée dans les points de l'ombre géométrique pour lesquels la somme des chemins parcourus par l'onde lA et par sa résultante sur r est égale à la somme des chemins parcourus par $l'A'$ et par sa résultante; par conséquent, si ces résultantes étaient exactement dirigées, la première suivant rL et la deuxième suivant $r'L'$, le lieu de la frange centrale brillante serait déterminé par la condition $rL + rL = rL' + r'L'$.

Et il est facile de voir que cette condition est remplie par le sommet r du parallélogramme construit sur rL ; mais, en partant du point r pour se rapprocher de l'écran, la série des points qui remplissent cette condition forme une ligne courbe qui vient aboutir très près du point L , si l'écran est très incliné; quant aux franges sombres et brillantes des différents ordres, qu'elles seront plus larges du côté de lA et plus serrées du côté de $l'A'$.

Ces considérations peuvent faire comprendre combien il est difficile de produire avec les écrans des franges intérieures bien nettes; car, si l'image qui sert de point lumineux a une largeur sensible, l'écran se trouve incliné par rapport aux points lumineux qui forment les bords de l'image, et les systèmes de franges qui résultent de ces points viennent se projeter sur les systèmes de franges qui résultent des points du centre de l'image, et les effacer en grande partie par leur discordance.

Quand les corps qui donnent des franges intérieures ne sont pas terminés par des bords rectilignes, les phénomènes se compliquent dans leurs apparences de toutes les irrégularités de forme que présentent les corps; mais on peut toujours parvenir à se rendre compte des accidents souvent bizarres que l'on observe alors dans les franges. Il résulte, par exemple, des calculs de Fresnel que

l'ombre d'un petit cercle doit être éclairée dans son centre exactement comme si le petit cercle n'existait pas, et M. Arago a reconnu par l'expérience la justesse de cette conclusion; le point brillant du centre est parfaitement visible dans l'ombre d'un cercle de 2 millimètres de diamètre, et en s'éloignant à une distance convenable on peut même l'observer dans l'ombre d'un cercle de 1 centimètre. On conçoit que dans ces expériences il est nécessaire de coller les cercles opaques sur une lame transparente à faces bien parallèles, car un support, quelque délié qu'il fût, produirait, par lui-même et par sa jonction avec le cercle, divers systèmes de franges qui troubleraient le résultat cherché.

Les franges extérieures qui se produisent aux deux bords des écrans étroits ne sont pas toujours identiques avec celles qui se produisent au bord d'un écran d'une largeur indéfinie, elles présentent souvent des anomalies si extraordinaires qu'elles sont à peine reconnaissables; mais en les observant attentivement l'on reconnaît bientôt qu'elles ne sont altérées que dans les cas où les écrans sont assez étroits pour que la portion de l'onde qui rase l'un des bords exerce une action sensible sur celle qui rase l'autre bord; à ces exceptions près, les franges extérieures des écrans étroits sont toujours pareilles aux franges extérieures des écrans indéfinis.

Après avoir analysé les phénomènes des franges intérieures pour une lumière homogène telle que la lumière rouge, il est facile de voir en général ce qui arrivera pour les autres lumières simples, et aussi pour les lumières diversement composées. Toutes choses égales d'ailleurs, les franges seront d'autant plus étroites et plus serrées que la lumière qui les produit aura des ondulations plus courtes; car plus l'ondulation est courte, et moins il faut s'écarter du centre de l'ombre géométrique pour arriver au point où la différence des chemins parcourus est une demi-ondulation. Lorsqu'on est une fois parvenu à connaître les largeurs des franges et leurs distances pour toutes les couleurs simples qui entrent dans une lumière composée, il ne reste plus qu'à déterminer pour un point donné de l'ombre quelles sont les intensités des couleurs qui l'éclairaient, et à composer ces couleurs élémentaires d'après leurs proportions pour avoir la teinte résultante.

L'explication de l'expérience du docteur Young se présente maintenant comme une conséquence nécessaire des principes que nous venons de développer. Lorsqu'on intercepte la lumière qui rase l'un des bords de l'écran, toutes les franges intérieures doivent disparaître, puisqu'alors il n'y a plus d'interférences possibles; mais l'ombre qui reste n'est pas noire et absolument sans lumière; elle contient au contraire toute la lumière que la portion de l'onde non arrêtée peut y envoyer, et c'est en effet ce que l'expérience confirme. Cette

lumière devient diffuse dans toute l'étendue de l'ombre, en offrant toutefois des intensités variables dans les différens points, et dès qu'on cesse d'intercepter la lumière de l'autre bord, les interférences s'établissent pour doubler l'éclat en quelques points et pour l'éteindre complètement dans d'autres points; de là les franges brillantes et sombres.

Le phénomène observé par M. Arago, et dont nous avons parlé (§ 580), rentre pareillement dans la théorie précédente; mais de plus il conduit à une donnée fondamentale sur la propagation de la lumière. En effet, quand on dit que la frange brillante du milieu de l'ombre résulte du concours de deux lumières qui ont parcouru des chemins égaux, il est bien entendu que ces chemins sont parcourus dans le même milieu; car la véritable condition est que les nombres d'ondulations exécutées depuis le point de départ jusqu'au point d'arrivée soient les mêmes. Puisqu'une lame transparente très mince, interposée d'un côté de l'écran, déplace la frange centrale, on doit en conclure que la lumière qui traverse cette lame n'accomplit pas autant d'ondulations que la lumière de l'autre bord, qui traverse l'air seulement. On peut même pousser plus loin la conséquence, on peut déterminer la différence absolue des nombres d'ondulations de ces deux lumières. Si la frange centrale était transportée, par exemple, du côté de la lame transparente, et au lieu qui était occupé par la frange brillante du deuxième ordre, la lumière aurait perdu précisément une ondulation en traversant la lame transparente; car du point lumineux en ce point les longueurs absolues des chemins parcourus en passant par les bords de l'écran, sont d'une ondulation. Or, puisqu'on y trouve la frange centrale, qui correspond à des nombres égaux d'ondulations, il faut bien que la traversée de la lame produise sur la lumière le même effet que la perte d'une ondulation. Si la frange centrale tombait sur la troisième frange brillante, la lumière aurait éprouvé en retard de deux ondulations en traversant la lame transparente, etc.

Donc, dans les substances transparentes et solides, les ondulations sont plus courtes que dans l'air, et il est facile par ce qui précède de déterminer leurs longueurs. On trouve ainsi cette loi remarquable, que les longueurs d'ondulations sont proportionnelles au rapport des sinus d'incidence et de réfraction, ou en d'autres termes, que l'indice de réfraction est précisément le rapport des longueurs d'ondulations.

C'est d'ailleurs un principe fondamental de la propagation de tous les mouvements vibratoires que les ondulations s'accomplissent toujours dans le même temps, quels que soient les milieux qu'elles traversent. Il en résulte donc que la lumière se meut plus lentement dans les milieux plus réfringens, et que le rapport des vitesses de la lumière dans deux milieux différens est repré-

senté par l'indice de réfraction, parce qu'il est représenté par le rapport des longueurs d'ondulations.

589. *Franges produites par les petites ouvertures.* — Soit r (Fig. 702) le point lumineux ou l'image produite au foyer d'une lentille sphérique ou cylindrique, et ss' la largeur de l'ouverture que la lumière traverse; on peut supposer que cette ouverture est donnée au moyen de l'appareil à biseaux que nous avons décrit précédemment. Les limites de l'ombre géométrique sont représentées par les lignes ra et ro' , et c'est la lumière du faisceau $a r o'$ qui éprouve la diffraction entre les deux biseaux.

Pour mieux faire sentir la cause qui produit ici les franges, nous distinguerons trois cas. Il peut arriver :

1^o Que l'on observe seulement des *franges extérieures*, c'est-à-dire des franges produites dans l'ombre géométrique de part et d'autre du faisceau lumineux intérieur;

2^o Que l'on observe seulement des *franges intérieures*, c'est-à-dire des franges produites dans le faisceau lumineux intérieur;

3^o Que l'on observe à la fois des franges intérieures et extérieures.

Franges extérieures. — Les franges de cette espèce ne peuvent jamais être obtenues que par des ouvertures très étroites, et même il arrive souvent que près de l'ouverture elles se trouvent mêlées de franges intérieures plus ou moins nombreuses, de telle sorte qu'il est nécessaire, pour les avoir pures, d'aller les observer à une grande distance derrière les biseaux. Voici les conditions sous lesquelles elles se produisent, et les lois de leur formation :

Du point r comme centre, décrivons un arc $as s'a'$, qui représente l'onde incidente (Fig. 702), et soit la ligne rx , qui passe par le milieu de l'ouverture, concevons un point r à une distance de quelques décimètres des bords s et s' . Si l'ouverture est assez étroite pour que la différence des distances rs et rs' ou rs' et rs soit égale seulement à une demi-ondulation, il n'y aura jamais de franges intérieures à une distance des biseaux plus grande que rx . En effet, pour tous les points, tels que r' , situés sur l'axe rx , et plus éloignés que le point r , la différence des chemins parcourus $r's'$ et $r's$ ou $r's$ et $r's'$ sera moindre qu'une demi-ondulation; par conséquent, de tous les ébranlemens envoyés en r' par l'arc as , aucun ne sera détruit; il en sera de même des ébranlemens envoyés au même point par l'arc as' . De plus, la résultante des premiers sera conspirant avec celle des seconds; il y aura donc une vive intensité de lumière. Ainsi, au delà du point r , jamais on n'observera de frange sombre sur l'axe rx .

Maintenant, si par le point r l'on mène la ligne indéfinie rs parallèlement aux biseaux, et que l'on détermine sur cette ligne les points s , s' , s'' , etc., pour lesquels les différences des chemins parcourus

rus $s_2' - s_2$, $s_1' - s_1$, $s_2' - s_1$, etc., soient respectivement 2 demi-ondulations, 4 demi-ondulations, 6 demi-ondulations, et en général un nombre pair de demi-ondulations, ces points s , s' , etc., seront les milieux des franges sombres du premier ordre, du deuxième ordre, du troisième ordre, etc. Au contraire, les milieux des franges brillantes du premier, du deuxième, du troisième ordre, etc., seront donnés par les points s , s' , s'' , etc., compris entre les premiers, et pour lesquels les différences des chemins parcourus $s - s_1$, $s' - s_1$, $s'' - s_1$, etc., sont respectivement 3 demi-ondulations, 5 demi-ondulations, 7 demi-ondulations, et en général un nombre impair de demi-ondulations.

En effet, dans le premier cas, s'il s'agit du point s' , par exemple, on conçoit que la portion $s_1 s_2$ de l'onde incidente puisse être divisée, à partir du point s , en quatre parties telles que les distances de s' à la fin de la première, de la deuxième, de la troisième et de la quatrième, qui se termine en s' , surpassent s' d'une demi-ondulation, deux demi-ondulations, trois demi-ondulations et quatre demi-ondulations. Alors la résultante des ébranlements que la première partie envoie en s' sera discordante avec celle de la deuxième partie, et sera détruite par elle, tandis que celle de la troisième partie sera, par la même raison, détruite aussi par celle de la quatrième. Ainsi, le point s' est le milieu d'une frange sombre. Pour le point s , on partagerait l'arc $s_1 s_2$ en deux parties, en six pour le point s'' , etc., et l'on ferait le même raisonnement.

Dans le second cas, s'il s'agit du point s' , par exemple, on conçoit que la portion $s_1 s_2$ de l'onde incidente puisse être divisée, à partir du point s , en cinq parties telles que les distances de s' à la fin de la première, de la deuxième, de la troisième, de la quatrième et de la cinquième, qui se termine en s' , surpassent respectivement s' d'un, deux, trois, quatre et cinq demi-ondulations. Alors, la résultante des ébranlements que la première partie envoie au point s' sera détruite par celle de la deuxième; tandis que celle de la troisième sera réduite par celle de la quatrième; mais il restera celle de la cinquième partie, qui viendra éclairer le point s' de toute son intensité. Ainsi le point s' sera le milieu d'une frange brillante. Pour le point s , on diviserait l'arc $s_1 s_2$ en trois parties, en sept pour le point s'' , etc., et l'on ferait le même raisonnement.

Telle est la cause de la formation des franges extérieures par des ouvertures étroites.

Pour donner une idée plus juste et plus complète de ces phénomènes, nous ajouterons encore ici les grandeurs absolues des ouvertures et les distances correspondantes où l'on commence à observer les franges extérieures dans toute leur pureté. Nous avons fait voir plus haut que ces franges commencent à se produire régulièrement à une distance telle que la différence $r_2 - r_1$ (Fig. 702) ou $r_2' - r_1$ soit

égale à une demi-ondulation. Or, il est facile de voir que si l'on représente cette distance par τ , et par r la distance du point lumineux aux biseaux, la condition dont il s'agit sera remplie quand la largeur v de l'ouverture sera donnée par l'équation

$$v = \frac{4\tau r d}{r + \tau}$$

d étant la longueur de l'ondulation pour la lumière sur laquelle on opère.

Le tableau suivant contient les largeurs qu'il faut successivement donner à l'ouverture pour que les franges extérieures commencent à paraître aux distances respectives de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 et 10 décimètres, en supposant, 1° que $r = 1$ mètre, et 2° que $r = \infty$, c'est-à-dire que le point lumineux soit d'abord à 1 mètre au devant des biseaux, et qu'il soit ensuite assez éloigné pour envoyer de la lumière parallèle.

Distances auxquelles les franges extérieures commencent à paraître seules	Largeur de l'ouverture des biseaux pour $r = 1000$ millim.	Largeur de l'ouverture des biseaux pour $r = \infty$.
millimètres.	millim.	millim.
100	0,474	0,408
200	0,642	0,704
300	0,756	0,863
400	0,842	0,996
500	0,908	1,112
600	0,964	1,220
700	1,010	1,320
800	1,050	1,410
900	1,084	1,490
1000	1,112	1,570

Ainsi le point lumineux étant à 1 mètre, et la lumière incidente étant le rouge moyen, si l'ouverture des biseaux est seulement 0,474 ou un peu moins de 1 demi-millimètre, il faudra s'éloigner à 1 décimètre derrière les biseaux pour voir les franges extérieures, et il faudra s'éloigner à 1 mètre si l'ouverture des biseaux est seulement 1,112, c'est-à-dire un peu plus de 1 millimètre. A de moindres distances, le faisceau central serait sillonné de franges intérieures plus ou moins nombreuses.

On peut jeter par la troisième colonne que pour des ouvertures égales il faut s'éloigner d'autant moins derrière les biseaux que la lumière incidente est moins divergente, puisqu'avec une ouverture de 1 millimètre 112, il suffit dans la lumière parallèle de s'éloigner à 1 demi-mètre, au lieu de 1 mètre, qui est nécessaire dans le premier cas.

Il n'était pas inutile de faire voir, par des valeurs numériques, que ces phénomènes s'accomplissent dans d'assez grandes dimensions pour que l'on puisse les produire et les observer avec une suffisante exactitude.

Il nous reste à présent à indiquer les lois géométriques

rales que suivent les franges extérieures dans leur développement.

Puisque les milieux des franges sombres du premier ordre forment la série des points dont les distances aux points s et s' sont de deux demi-ondulations, il est évident qu'elles se trouvent sur deux branches d'hyperboles ayant pour foyer les points s et s' , et pour grand axe une longueur égale à deux demi-ondulations. Par la même raison les franges des divers ordres se meuvent suivant des hyperboles dont les foyers sont encore en s et s' , et dont les grands axes sont respectivement pour longueurs quatre, six, huit, etc., demi-ondulations. Or, ces hyperboles se confondent sensiblement avec leurs asymptotes, et il est facile de voir, en représentant par v la largeur de l'ouverture, et par d la longueur d'une ondulation, que les tangentes des angles des asymptotes avec l'axe des franges sont

$$\begin{aligned} & \frac{d}{v} \quad \text{pour le premier ordre,} \\ & \frac{2d}{v} \quad \text{pour le deuxième ordre;} \\ & \frac{3d}{v} \quad \text{pour le troisième.} \end{aligned}$$

En prenant, par exemple, une largeur d'ouverture de 1 millimètre, ou a

$$\frac{d}{v} = \frac{0,000020}{1} = 0,00002$$

et l'angle correspondant est $2' 8''$.

Ces angles sont toujours assez petits pour être proportionnels à leurs tangentes, ainsi, celui du deuxième ordre est double de celui du premier, celui du troisième ordre triple, celui du quatrième ordre quadruple, etc. D'ailleurs la grandeur absolue du premier est en raison inverse de la largeur de l'ouverture. Ainsi, nous sommes conduits aux lois suivantes :

1°. La largeur des franges ou la distance des milieux de deux franges sombres consécutives est en raison inverse de la largeur de l'ouverture.

2°. De chaque côté de l'axe les franges sombres consécutives sont équidistantes, et leur distance est égale à la distance de l'axe à la frange sombre du premier ordre, on, ce qui revient au même, les distances des franges sombres à l'axe forment une progression arithmétique dont la raison est égale au premier terme.

3°. Les largeurs absolues des franges intérieures croissent proportionnellement à la distance à laquelle on les reçoit derrière les biseaux.

4°. Les largeurs absolues des franges sont en raison inverse des rapports de réfraction des milieux dans lesquels elles sont produites, car elles sont en raison inverse des ondes, et nous avons vu plus haut que les longueurs des ondes sont en raison inverse des rapports de réfractions.

Ces lois, qui se déduisent si simplement de la théorie de Fresnel, ont été établies pour la première fois dans le travail que nous avons fait en 1815, M. Biot et moi, sur les phénomènes de diffraction; elles étaient alors un pur résultat d'expériences; nous n'avions pu trouver aucune théorie pour les lier ou pour les expliquer, parce que nous adoptions exclusivement le système de l'émission, qui ne peut en réalité expliquer la moindre circonstance des phénomènes de la diffraction.

Franges intérieures. Soit r le point lumineux (Figure 703), a et s' les biseaux, et r un point pris sur l'axe rax à une distance telle que la différence $ra - r'a$, ou $rs' - r'a$ soit une demi-ondulation. Nous venons de voir qu'au delà du point r il n'y a pas de franges intérieures; mais nous allons montrer qu'en deçà du point r , c'est-à-dire plus près des biseaux, il y a successivement sur l'axe des franges sombres et brillantes. En effet, on conçoit qu'il existe des points a, s', s' pour lesquels les différences $sa - s'a$ ou $s's' - s'a$, $s'a - s'a$, ou $s'a' - s'a$, $s'a' - s'a$, ou $s'a' - s'a$, etc., seront respectivement 2, 4, 6, ou en général un nombre pair de demi-ondulations, et ces points seront les milieux des franges sombres, puisque chacun des ébranlements qu'ils reçoivent des parties sa et $s'a'$ de l'onde incidente est détruit par lui-même. Au contraire, les points $a, a',$ etc., compris entre les premiers, sont tels que les différences $sa - a'a$, ou $a'a' - sa$, $a'a' - sa$, ou $a'a' - sa$, etc., seront de 3, 5, ou en général un nombre impair de demi-ondulations, et ces points seront les milieux des franges brillantes, puisqu'ils éprouvent de la part des arcs sa , et $s'a'$ des ébranlements concordans, qui sont chacun séparément capables de les éclairer. Ainsi la condition qui nous a servi dans la page 423 à déterminer les distances où les franges extérieures commencent à être seules nous donne pareillement les limites desquelles il faut partir pour observer des franges intérieures en se rapprochant des biseaux.

Maintenant, pour donner une idée du nombre et des distances des franges intérieures, nous examinerons seulement le cas où la lumière incidente est de la lumière parallèle. L'onde qui tombe sur les biseaux étant alors représentée par la ligne droite rs' (Fig. 704), prenons sur l'axe du faisceau un point r tellement situé que la différence $rs - r'a$ ou $rs' - r'a$ soit un nombre pair de demi-ondulations, par exemple, dix demi-ondulations. Ce point r sera le milieu d'une frange sombre, puisque chacun des ébranlements des arcs sa et $s'a'$ se détruit séparément, bien que cette destruction ne soit pas totale. Pour des points voisins du point r , et comme lui situés sur l'axe, ou plus près ou plus loin des biseaux, la différence sera une demi-ondulation ou neuf demi-ondulations, donc il y aura lumière, comme nous venons de le voir dans la figure précédente, et le chemin qu'il faudra faire pour arriver à ces points sera d'autant plus

court que les biseaux seront plus écartés l'un de l'autre. Mais arrêtons-nous au point r , et essayons de faire voir que sur la ligne horizontale rn il y aura à côté de lui des franges alternativement brillantes et sombres. Concevons que l'on prenne sur rn un point s , déterminé par la double condition que les différences $sa - sm$, et $sa' - sm$ soient l'une et l'autre un nombre pair de demi-ondulations, par exemple, la première huit et la seconde quatorze, il est évident que le point s sera alors le milieu d'une frange sombre; et, en général, il y aura sur rn autant de franges sombres qu'il y aura de points analogues au point s , c'est-à-dire tels que les différences $sa - sm$ et $sa' - sm$ soient l'une et l'autre égales à un nombre pair quelconque de demi-ondulations; d'ailleurs il est facile de voir que ces franges sombres seront d'autant plus nombreuses et plus serrées que l'ouverture sera plus grande, et le point lumineux et la ligne rn l'un et l'autre plus rapprochés des biseaux. Au contraire, les franges brillantes seront déterminées par les points a , pour lesquels les différences $aa - am$ et $aa' - am$ sont chacune égales à un nombre impair de demi-ondulations, puisque alors ces points recevront de chaque partie am et am' de l'onde incidente des ébranlements conspirans, et dont chacun séparément serait capable de les éclairer.

Franges intérieures et extérieures. Pour qu'il se produise à la fois des franges intérieures et extérieures, il suffit que l'ouverture soit assez large pour donner naissance à des franges intérieures, et assez étroites pour que les portions de l'onde qui touchent l'un des bords donnent une résultante sensible dans l'ombre de l'autre bord. Sous cette double condition chacun des systèmes de franges est produit suivant les lois qui lui sont propres.

Les principes que nous venons d'exposer sur les modifications remarquables que présente la lumière homogène d'une seule couleur, en passant au travers des ouvertures rectangulaires, peuvent être étendus à toutes les couleurs simples séparément, et par conséquent à une lumière composée quelconque; puisque, dans tout mélange, chaque couleur élémentaire suit très exactement les lois qu'elle suivrait si elle était seule. Ces mêmes principes peuvent être appliqués avec plus ou moins de simplicité ou de complication aux ouvertures, de diverses formes, régulières, irrégulières ou bizarrement variées dans leurs contours. Il est facile de voir, par exemple, que les ouvertures circulaires donneront des franges annulaires, soit extérieures, soit intérieures, soit mêlées de l'une et l'autre espèce, suivant le diamètre des ouvertures, la distance du point éclairant et celui du tableau sur lequel on fait l'observation. On pourrait exercer sa sagacité à varier les conditions qui font varier les franges, à compliquer les formes de mille accidens divers, et à démembrer ensuite ou analyser ces complications au moyen de la théorie; mais la science n'aurait probablement rien à gagner à ces recher-

ches de détail, qui deviendraient seulement un jeu d'esprit propre à satisfaire une stérile curiosité. Tout le monde sait, par exemple, qu'en regardant au travers des barbes d'une plume quelque corps lumineux de petite étendue, comme la flamme d'une bougie, on observe de vives couleurs qui se succèdent périodiquement dans un certain ordre. Ces couleurs sont certainement produites par les linéamens qui composent la barbe de plume et par les fentes étroites qu'ils laissent entre eux. Leur éclat et leur distribution dépendent de la grosseur de ces linéamens et de la forme de ces fentes; mais après ce que nous avons dit sur les principes généraux de la théorie, il serait sans doute bien inutile de faire une analyse minutieuse de ces couleurs et de tous les accidens qui peuvent à l'infini diversifier leurs apparences.

500. *Franges produites par la réflexion sur les surfaces polies très étroites, et sur les surfaces irrégulièrement striées.*—Au devant du point lumineux r on présente perpendiculairement ou obliquement (Fig. 705) un miroir métallique de très petite dimension dans un sens, ayant, par exemple, une longueur quelconque, et une largeur mn' qui ne dépasse pas 1 ou 2 millimètres, alors le faisceau réfléchi ro , $m'o'$ présente un système de franges intérieures et un système de franges extérieures, et quelquefois les deux systèmes ensemble. Ces phénomènes sont tout-à-fait analogues à ceux que nous venons de décrire; car le faisceau réfléchi est exactement comme s'il partait du point r' , image du point r , et qu'il fût obligé de traverser une ouverture d'une largeur mn' : seulement la direction dans laquelle il le traverse est oblique au lieu d'être perpendiculaire, comme nous l'avons toujours supposé. Mais il n'est pas nécessaire d'analyser ici l'influence de cette circonstance, nous l'avons suffisamment indiquée en parlant des écrans inclinés, page 422, figure 701.

Une surface polie qui se trouve accidentellement sillonnée d'une ou de plusieurs stries irrégulières produit encore des effets analogues. Soit que les rayons incidents cessent d'être réfléchis régulièrement sur plusieurs points de la surface striée, comme sur les arêtes des stries, ou même dans leur profondeur, soit qu'ils aient seulement après la réflexion des directions rapidement changeantes d'un point à l'autre; il se trouve alors dans les rayons réfléchis des inégalités de chemins parcourus qui déterminent des interférences, et par conséquent des franges sombres et brillantes dans le cas de la lumière simple, et des franges, ou plutôt des teintes diversement colorées dans le cas de la lumière blanche.

Ces phénomènes peuvent être observés sur toutes les surfaces métalliques qui n'ont pas été polies avec de la poudre assez fine, et aussi sur toutes les surfaces parfaitement polies qui sont enduites d'une couche de graisse, de vernis, ou même de gouttelettes de rosée. En passant, par exemple, le doigt

sur une glace humide, on laisse une trace qui donne souvent de très vives couleurs, dont l'ordre et l'aspect chaugent dans tous les sens avec la position de l'œil.

Les couleurs éclatantes de la nacre de perle sont encore dues à la même cause, bien que dans certaines circonstances elles semblent se rapprocher davantage des vives nuances des réseaux que nous allons examiner dans un instant. La substance de la nacre se trouve, comme on sait, dans l'intérieur de l'écaille d'une certaine espèce d'huîtres; elle se forme, avec le temps, d'une multitude de couches très minces, qui se déposent successivement, chacune prenant toujours la forme et les contours de la couche précédente. En travaillant un morceau de nacre on en coupe les joints naturels suivant une multitude de lignes sinuées, et les surfaces qui en résultent, quelque polies qu'elles paraissent, se trouvent sillonnées dans tous les sens d'une infinité de stries irrégulières, dont l'œil ne peut directement saisir ni la trace ni la profondeur. Mais les rayons de lumière qui tombent sur ces irrégularités sans nombre, et qui s'y réfléchissent, sont nécessairement forcés de parcourir des chemins inégaux pour revenir à l'œil; de là des interférences infiniment multipliées, et cette profusion de couleurs brillantes que présentent les surfaces de nacre artistiquement travaillées.

Une expérience ingénieuse, imaginée par H. Brewster, démontre directement que les couleurs de la nacre sont dues en effet aux accidents de sa surface. Elle consiste à prendre, avec toute la fidélité possible, l'empreinte d'une surface de nacre sur de la cire à cacheter, de la résine, du mastie, ou même sur un métal en fusion. Alors, en donnant tous les accidents de sa forme, la nacre donne en même temps ses couleurs et tous ses reflets brillants. Ce qui prouve bien, comme nous l'avons tant de fois répété, que dans tous les phénomènes de diffraction la matière agit par sa forme, et jamais par la nature de sa substance.

501. Franges et spectres produits par les réseaux.

On doit à Fraunhofer une série d'observations extrêmement curieuses sur les phénomènes que présente la lumière en traversant des réseaux de diverses formes. Ses découvertes sur ce point important de la diffraction offrent encore aujourd'hui un très haut degré d'intérêt, bien qu'elles soient devenues des conséquences nécessaires du système des ondulations, et l'analyse que nous en allons faire donnera une idée de l'esprit d'invention et de l'admirable exactitude de cet habile observateur.

Les réseaux parallèles se composent de petits intervalles transparents ou réflecteurs, égaux entre eux et parallèles, séparés par d'autres intervalles pareillement égaux entre eux et parallèles, mais qui doivent arrêter la lumière sans la transmettre ni la réfléchir régulièrement.

Ainsi, des traits parallèles et équidistants tracés au diamant ou avec une pointe sur une surface polie forment un véritable réseau; le sillon du trait lui-même en est la partie opaque. Il faut seulement qu'ils soient assez rapprochés pour que l'on puisse en compter vingt, trente, cinquante, ou même plusieurs centaines dans la largeur de 1 millimètre. Si ces traits ont été faits sur des lames transparentes à faces parallèles, les effets du réseau peuvent être observés par transmission et par réflexion; mais sur les corps opaques on ne peut les observer que par réflexion.

On peut encore faire des réseaux, comme Fraunhofer avait fait d'abord, soit en collant des feuilles d'or sur un verre parallèle, pour enlever ensuite cette couche opaque de distance en distance avec une pointe très fine, soit en enroulant des cheveux, des fils de soie ou des fils métalliques sur deux vis parallèles à filets très fins, et parfaitement égales, maintenues par des traverses à la distance d'un ou de plusieurs centimètres.

Voici maintenant le mode d'observation que Fraunhofer avait adopté, et les résultats généraux auxquels il est parvenu :

La lumière solaire, réfléchi horizontalement par le miroir d'un héliostat, entre dans la chambre noire par une petite ouverture, tantôt par un tron rond, tantôt par une fente verticale fermée par deux biseaux adaptés au volet. Cette fente est, par exemple, de 5 ou 6 centimètres de hauteur sur une largeur d'environ 2 ou 3 dixièmes de millimètre.

A une distance assez grande du volet est un théodolite ou un instrument quelconque portant une lunette horizontale et propre à mesurer les angles. Nous supposons que cette lunette a (Fig. 706) se meuve autour d'un axe vertical passant en v à quelques pouces au devant de l'objectif; c'est sur l'extrémité de cet axe, c'est-à-dire sur un plateau fixe $r\ r'$, au centre duquel il passe, que l'on ajuste le réseau $s\ s'$ de manière que ses fils soient verticaux. Le trait horizontal de lumière blanche tombe perpendiculairement sur le réseau, le traverse et vient pénétrer dans l'objectif de la lunette, qui ne doit recevoir aucune autre lumière. Alors, en regardant par l'oculaire, on observe le phénomène curieux représenté dans la figure 707.

1°. La fente a du volet paraît au milieu, éclairée d'une lumière blanche, ayant ses bords parfaitement tranchés, comme si le réseau n'existait pas, et de chaque côté les apparences sont exactement symétriques.

2°. Après l'obscurité complète r qui environne l'image de la fente, paraît un brillant spectre $e'c'$, ayant le violet en dedans, vers e' , et le rouge en dehors, vers c' ; là il se termine vers un espace obscur r' .

3°. Au delà de r' paraissent à la suite les uns des autres plusieurs spectres de diverses intensités, occupant les espaces $e''c''$, $e'''c'''$, $e''''c''''$, etc., ayant tous, comme le premier, le violet en dedans

et le rouge en dehors; seulement le rouge du deuxième tombe sur le violet du troisième, le rouge de celui-ci sur le violet du quatrième, etc.

4°. Ceux de ces spectres qui sont assez étalés et assez brillants font voir les mêmes raies noires que le spectre solaire direct (544); on y distingue avec une grande netteté ces raies caractéristiques que nous avons désignées par les lettres c, d, e, f, g (Fig. 652); mais, chose remarquable, les rapports de leurs distances mutuelles sont changés.

5°. Si l'on considère la même raie dans les différents spectres, la raie r , par exemple (qui est marquée r' dans le premier, r'' dans le deuxième, etc.), on trouve que dans le deuxième sa distance au milieu λ de l'image totale est double de ce qu'elle est dans le premier, puis triple dans le troisième, quadruple dans le quatrième, etc.; d'où il résulte évidemment que les mêmes couleurs ou les mêmes raies occupent dans le deuxième spectre un espace double de celui qu'elles occupent dans le premier, triple dans le troisième, quadruple dans le quatrième, etc.

Tous ces résultats remarquables ont été obtenus par un grand nombre d'expériences et par des mesures d'une extrême précision.

L'appareil de Fraunhofer était, comme le micromètre de Fresnel, très propre à déterminer de petits angles et de petites distances; on voit qu'il suffisait de faire mouvoir la lunette jusqu'à l'instant où les diverses raies venaient coïncider avec le fil micrométrique intérieur. L'angle $\angle r' \lambda'$ qu'elle parcourait était l'angle formé par le rayon diffracté avec le rayon direct.

M. Babinet, qui a fait beaucoup de recherches intéressantes sur la lumière, et particulièrement sur le système des ondulations, a proposé un moyen beaucoup plus simple pour mesurer les distances des spectres de différents ordres (*Annales de Physique et de Chimie*, tome 40, page 160). Au lieu d'une seule fente dans le volet, il en emploie deux, dont on peut, si l'on veut, varier les distances, puis il les observe en même temps avec le même réseau, qu'il rapproche ou qu'il éloigne convenablement, pour amener en coïncidence parfaite les mêmes raies des spectres homologues fermés l'un à gauche de l'ouverture de droite, l'autre à droite de l'ouverture de gauche. Connaissant l'écart des deux ouvertures et leur distance au réseau, il est facile d'en déduire l'angle cherché.

Enfin Fraunhofer a observé deux autres conditions très remarquables de ces phénomènes, savoir :

1°. Que les déviations des mêmes couleurs, ou plus exactement des mêmes raies, a, c, d, e, f, g , ne dépendent ni de la largeur de l'intervalle transparent des réseaux, ni de la largeur de l'intervalle opaque, mais seulement de la somme de ces deux largeurs.

2°. Que les grandeurs absolues de ces déviations sont en raison inverse de cette somme faite d'un intervalle transparent et d'un intervalle opaque,

tellement que si dans chaque réseau l'on multiplie cette somme par les déviations correspondantes des raies a, c, d, e, f, g du premier spectre, on obtient des nombres constants, qui se reproduisent toujours dans tous les réseaux et dans toutes les expériences.

Voici ces nombres transformés en millimètres :

Lettres qui indiquent les raies ou les rayons correspondants du spectre solaire.	Produit de la déviation par la somme des intervalles transparents et transparents en millimètres.	Longueur des ondulations en millimètres.	Couleurs correspondantes.
B.	688	645. . .	Rouge extrême.
C.	656	596. . .	Orangé rouge.
D.	589	571. . .	Jaune orangé.
E.	526	532. . .	Vert jaune.
F.	484	492. . .	Bleu vert.
G.	429	459. . .	Indigo bleu.
H.	393	439. . .	Violet indigo.
		406. . .	Violet extrême.

Nous avons rapporté dans la troisième colonne les nombres donnés par Fresnel pour exprimer les longueurs d'ondulations des diverses couleurs du spectre (page 411), et si l'on se reporte à la fig. 652 pour observer les nuances correspondantes aux raies a, c, d, e, f, g et h , on sera frappé de l'accord admirable qui existe entre ces résultats. La raie a tombe en effet près de la limite du jaune et de l'orangé, tandis que la raie r tombe à la limite du jaune et du vert, et il se trouve seulement 3 millièmes de millimètre entre les nombres de Fresnel et ceux de Fraunhofer. Or, c'est sans le savoir que Fraunhofer déterminait ainsi les longueurs des ondulations. Les différences considérables que l'on observe entre les autres nombres tiennent, d'une part, à ce que les raies correspondantes ne touchent pas aux limites des couleurs du spectre, et à ce que Fraunhofer a pu observer aux extrémités du spectre, et surtout vers le violet, des couleurs qui devaient être tout-à-fait insensibles dans les expériences de Fresnel.

Après avoir exposé ces résultats tels que l'expérience les a donnés, il ne sera pas difficile d'en indiquer la cause. C'est M. Babinet (*Ann. de phys. et de chim.*, t. 40, pag. 169) qui en a, je crois, le premier ramené toutes les circonstances à des considérations très simples.

Soit an' le réseau (Fig. 708) ab, cd, ef, gh , les parties opaques et bc, de, fg , etc., les parties transparentes; supposons le, pour plus de simplicité, assez éloigné de la fente du volet pour que les rayons blancs incidents puissent être regardés comme parallèles; λ sera l'œil de l'observateur et $\lambda\lambda'$ le rayon direct. Les phénomènes pouvant être observés aussi à l'œil nu, nous supprimerons le théodolite et la lunette.

Les sommes faites d'un intervalle opaque et d'un transparent, étant très petites, il y aura toujours une de ces sommes, telles que fa , pour laquelle la

différence $\lambda h - \lambda f$, fera précisément 2 demi-ondulations d'une certaine couleur, par exemple, du violet extrême; c'est dans cette direction que l'on verra le violet extrême du premier spectre. En effet, si l'espace fh était tout-à-fait ouvert, la résultante des ébranlemens que la portion fh de l'onde enverrait au point t serait nulle, mais l'espace opaque hg arrêtant les ébranlemens qui détruiraient ceux de l'espace transparent gf , on voit qu'il arrivera en t de la lumière violette, et qu'il en arrivera plus que dans les directions voisines td et ti . Mais l'intensité de cette lumière dépendra nécessairement du rapport qui existe entre la largeur de l'espace opaque, et celle de l'espace transparent; le maximum aura lieu quand ces espaces seront à peu près égaux, car hg étant moindre que fg , il passerait une partie des rayons discordans, et hg étant plus grand que fg , il y aurait d'arrêté, une partie des rayons concordans, avec le rayon tf .

Si maintenant du point t comme centre, avec un rayon tf , on décrit un arc fv , cet arc, considéré comme une ligne droite, forme avec fh un triangle rectangle fvh , semblable au triangle lhc ; d'en il résulte que l'angle de déviation cth , que nous désignerons par v , est égal à l'angle hfe ; par conséquent,

$$\sin. v = \frac{\lambda v}{\lambda f} \text{ ou } \sin. v = \frac{d}{s},$$

en désignant par s la somme d'un intervalle opaque et transparent et par d la longueur d'ondulation qui est égale à λv . Mais ces déviations des premiers spectres sont si petites qu'elles peuvent être prises pour leur sinus, d'où il suit :

$$v \approx d.$$

C'est-à-dire que la déviation, multipliée par la somme d'un intervalle opaque et transparent, est égale à une longueur d'onde, comme l'indique le tableau précédent.

Au delà de fh il se trouvera un autre intervalle opaque et transparent, ou transparent et opaque, tel que les distances de ses deux extrémités au point t aient une différence de 4 demi-ondulations. Soit np cet espace, puisque $tp - tn$ est égale à 4 demi-ondulations, on pourra diviser l'espace np en 4 parties à peu près égales, de telle sorte que les distances des points de division au point t , croissent

successivement de 1 demi-ondulation; si ces 4 parties étaient perméables à la lumière, les rayons passant par la première seraient discordans avec ceux de la deuxième, et se détruiraient; ceux de la troisième seraient discordans avec ceux de la quatrième, et se détruiraient pareillement. Ainsi le point t ne recevrait pas de lumière dans cette direction, et il n'en recevrait pas non plus, si dans ces 4 parties deux consécutives étaient opaques, et les deux autres transparentes, c'est-à-dire si l'espace opaque du réseau était égal à son espace transparent; mais, ce cas excepté, le point t sera éclairé, et c'est dans cette direction tp que l'on verra le violet du deuxième spectre.

Il est facile de voir, comme plus haut, qu'en désignant par v'' l'angle de tn avec tl on aura :

$$\sin. v'' = \frac{2d}{s} \text{ ou } v'' \approx 2d.$$

Ainsi, en généralisant ces résultats, la même couleur sera produite par des retards

de 2 demi-ondulations pour le 1^{er} spectre,

4	20°
6	30°
8	40°
10	50°
40	20°

Car, on peut quelquefois distinguer même le vingtième spectre; toutes les lois établies par Fraunhofer et rapportées plus haut sont des conséquences évidentes de ce principe fondamental.

Cependant si l'on voulait se rendre un compte exact, non seulement des positions des différens spectres, mais encore de l'intensité relative de leurs couleurs, il faudrait avoir recours à des calculs plus ou moins compliqués, car il pourrait sans doute arriver que pour certains rapports entre les largeurs des espaces opaques et transparents, la lumière envoyée au point t fût la somme des lumières envoyées par plusieurs interstices voisins, et peut-être même la position du maximum d'intensité n'est-elle pas toujours rigoureusement celle qui répond à une différence d'un nombre juste d'ondulations.

Le tableau suivant contient les résultats des observations de Fraunhofer.

Nombres des raies.	Intervalles opacités et transparences des raies.	DÉVIATIONS						
		SUR DIFFÉRENTS RAIES POUR LE PREMIER ORDRE.						
		Déviations pour la raie B.	Déviations pour la raie C.	Déviations pour la raie D.	Déviations pour la raie E.	Déviations pour la raie F.	Déviations pour la raie G.	Déviations pour la raie H.
1	$f=0,017000$	44' 45"	42' 45"	38' 19"	34' 14"	32' 34"	27' 58"	25' 44"
	$g=0,036111$							
	$s=0,053111$							
2	$f=0,030102$	29 50	28 28	25 33	22 51	21 4	18 38	17 11
	$g=0,049186$							
	$s=0,079288$							
3	$f=0,008312$	"	26 24	25 29	22 44	20 56	18 30	16 59
	$g=0,053165$							
	$s=0,079477$							
4	$f=0,014662$	22 22	21 20	19 10	17 8	15 47	13 57	12 49
	$g=0,080927$							
	$s=0,105789$							
5	$f=0,104550$	"	14 10	12 42	11 19	10 26	9 13	8 18
	$g=0,054708$							
	$s=0,159258$							
6	$f=0,023044$	"	10 41	9 35	8 34	7 52	7 1	6 24
	$g=0,189970$							
	$s=0,211014$							
7	$f=0,156490$	"	"	6 21	5 40	5 13	"	"
	$g=0,185110$							
	$s=0,318600$							
8	$f=0,385910$	"	"	4 15	"	"	"	"
	$g=0,080304$							
	$s=0,466214$							
9	$f=0,364830$	"	"	3 28	"	"	"	"
	$g=0,189460$							
	$s=0,554090$							
10	$f=0,077907$	"	"	2 57	"	"	"	"
	$g=0,060700$							
	$s=0,688607$							

Dans la deuxième colonne, f représente la largeur de l'espace transparent en millimètres, g la largeur de l'espace opaque, et s la somme d'un espace opaque et transparent.

Les déviations rapportées dans les sept colonnes, $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta, \eta$, sont les moyennes des déviations observées sur des spectres de différents ordres, par exemple dans le réseau n° 6.

On avait pour la raie α les déviations suivantes :

Dans le premier spectre . . .	8' . . 33",4
deuxième	17' . . 6",6
troisième	25' . . 39",7
quatrième	34' . . 18",9

cinquième	42' . . 48"
sixième	51' . . 24",8
neuvième	1°. 17' . . 8"
dixième	1°. 25' . . 40",7
onzième	1°. 34' . . 17",3
douzième	1°. 43' . . 52",3
treizième	1°. 51' . . 24",3

Ces déviations observées ont été divisées par 2 pour le deuxième spectre, par 3 pour le troisième, etc., et on a pris la moyenne de toutes les valeurs résultantes; c'est cette moyenne qui est inscrite au tableau.

Nous ajouterons encore, d'après Fraunhofer,

quelques remarques sur les apparences des divers réseaux.

Pour le n° 4, les sixième, septième et huitième spectres, sont très peu visibles; t est en effet la septième partie de s à très peu près.

Pour le n° 5, le troisième spectre est presque invisible; t est les $2/3$ de s .

Pour le n° 6 le septième spectre est à peine visible; t est presque le septième de s .

Pour le n° 7, le deuxième spectre est presque nul; t est moitié de s .

C'est le résultat que nous indiquions précédemment.

Pour le n° 8 le cinquième spectre et le sixième sont presque invisibles; t est les $5/6$ de s .

Pour le n° 9, le troisième spectre est presque nul; t est les $2/3$ de s .

Pour le n° 10, le neuvième spectre est presque nul; t est $1/9$ de s .

Ainsi dans un réseau fait au diamant sur le verre, si l'on avait, par exemple, 400 divisions dans 1 millimètre, et que l'on vit toute la série des spectres hormis le dixième, on pourrait conclure que l'épaisseur du sillon tracé par le diamant serait 1 dixième de la grandeur d'un intervalle ou $1/4000$ de millimètre; épaisseur qui se pourrait certainement être mesurée avec autant d'exactitude par aucun moyen jusqu'à présent connu.

Tout ce que nous venons de dire sur les réseaux qui agissent par transmission s'applique sans difficulté aux réseaux qui agissent par réflexion; de là l'explication des brillantes couleurs que l'on observe sur toutes les surfaces polies qui ont été régulièrement striées.

Nous avons remarqué (§ 46) que les raies du spectre sont en général diversement espacées, quand le spectre est produit par des substances ayant des pouvoirs dispersifs différents; dans les phénomènes que nous venons d'étudier, au contraire, les intervalles des raies sont toujours proportionnels. Ainsi le spectre diffracté est comme un type constant, ou si l'on veut, comme un *spectre normal* auquel on peut rapporter les dimensions variables des spectres des différentes substances.

Après avoir analysé les phénomènes des réseaux parallèles, il serait superflu d'exposer en détail les apparences que peuvent produire les réseaux croisés de diverses manières. Nous nous contenterons de citer deux exemples qui serviraient en même temps à donner une idée des couleurs brillantes que l'on peut obtenir avec les appareils de cette espèce, et à faire voir que les jeux de lumière les plus compliqués et les plus bizarres dépendent toujours des interférences suivant des principes très simples.

Réseaux à mailles carrées. Un réseau à mailles carrées peut s'obtenir très simplement en croisant à angle droit deux réseaux parallèles et égaux. Un tel système disposé verticalement devant l'objectif de la lunette, et recevant la lumière solaire par une petite ouverture ronde, présente le brillant phéno-

mène qui est représenté dans la figure 700. Tous les petits rectangles symétriquement distribués autour de l'image x de l'ouverture sont entourés de spectres plus ou moins allongés et plus ou moins détachés les uns des autres. Leur éclat est assez remarquable, et leur nombre si grand que nous n'essaierons pas de les compter. Avec un peu de patience et de soin on parviendra facilement à se rendre compte de toutes les particularités de cette expérience, qui est l'une des plus brillantes de l'optique.

Réseaux à mailles rondes. Nous indiquerons seulement l'image que l'on obtient en plaçant devant l'objectif de la lunette un écran percé de deux trous ronds, $0^{\text{mm}},6028$ de diamètre et dont la distance du centre est $1^{\text{mm}},0371$. Cette image est représentée dans la figure 710.

Chacun des petits compartiments indiqués sur la figure indique le lieu d'un spectre, dont les couleurs sont en général vives et très étalées.

Quand les trous sont plus multipliés le nombre des spectres devient plus grand, mais leur distribution et l'ordre toujours symétrique suivant lequel ils se groupent dépend de la grandeur des trous, de leur intervalle et de leur arrangement.

592. Apparences au foyer des lunettes.

Lorsqu'on regarde une étoile avec une lunette ou un télescope ayant un pouvoir amplifiant qui surpasse 200, on voit au foyer de l'instrument une image très nette de l'étoile, offrant un disque rond à bords bien tranchés, puis l'on distingue autour du disque une série d'anneaux alternativement brillants et sombres, dont les limites sont légèrement colorées. Il paraît que cette observation a été faite pour la première fois par W. Herschell, au moyen de ses puissants télescopes avec lesquels il fit de si belles découvertes dans le ciel.

En plaçant un diaphragme au devant de l'objectif, pour en réduire l'ouverture, l'image de l'étoile augmente de largeur, sans cesser pour cela d'être parfaitement ronde et nettement terminée; on peut même par ce moyen lui donner toutes les apparences d'une plaquée; il suffit, par exemple, de réduire le diaphragme à n'avoir plus que 2 ou 3 centimètres d'ouverture, ou à peu près, pour une lunette de 2 mètres de distance focale; en même temps les anneaux qui entourent le disque s'élargissent et se colorent; ils offrent successivement des nuances de blanc, de rouge, de noir et de bleu plus ou moins pâle.

M. Arago a fait de plus cette observation curieuse, qu'en parlant du foyer où l'on voit nettement le disque et les anneaux, si l'on enfonce graduellement l'oculaire, le disque devient sombre au milieu, puis tout-à-fait noir; bientôt cette tache noire s'élargit de plus en plus; un point lumineux reparaît en son centre, qui s'élargit à son tour, pour donner naissance à une autre tache noire, et l'on peut ainsi compter au centre de l'image plu-

sseurs alternatives d'ombres et de lumière. Mais si l'on arrête l'oculaire dans l'une de ces positions pour lesquelles le milieu de l'image est obscur, on voit de temps à autre un point brillant paraître un instant vers le milieu de la tache noire; ce phénomène se produit seulement sur les étoiles qui *scintillent*, et jamais sur celles qui sont tranquilles on qui ne présentent pas à l'œil un ces changements rapides de couleurs qui constituent la scintillation.

M. Herschell fils a fait un grand nombre d'expériences intéressantes sur les effets que l'on obtient en plaçant, devant l'objectif des grandes lunettes, des diaphragmes de différentes formes, simples ou multiples, c'est-à-dire composés d'une seule ouverture ronde, carrée, triangulaire, annulaire, etc., ou composés d'un grand nombre de petites ouvertures égales, symétriquement arrangées autour de l'axe.

1^o. Avec une ouverture formant le triangle équilatéral, l'image offre l'apparence représentée dans la *figure 711*; c'est le disque de l'étoile, entouré d'un anneau noir, et orné de six rayons, minces, droits et assez vivement éclairés. Trois de ces rayons correspondent aux angles du triangle, et trois au milieu des côtés; les uns sont composés de petites franges *longitudinales*, et les autres de petites franges *transversales*; c'est ce qui devient évident quand on enfonce un peu l'oculaire, car on obtient alors l'effet indiqué dans la *figure 712*.

2^o. Avec une ouverture annulaire on obtient les apparences représentées dans les *figures 713* et *714*. La première est l'image de la *chèvre* et la seconde celle de la double étoile de *Castor*.

3^o. Avec une ouverture formée par l'intervalle compris entre deux carrés concentriques on obtient la *figure 715*. Les quatre rayons qui forment la croix sont composés de taches alternativement brillantes et sombres; les premières paraissent *irisées*.

4^o. Avec un assemblage de petits triangles équilatéraux régulièrement arrangés on obtient la *figure 716*. C'est une série de disques circulaires, rangés sur six rayons égaux et également espacés, qui offrent, à partir du disque central, les vives couleurs du spectre.

Tous ces phénomènes, observés par Herschell, par M. Arago et par M. Herschell fils, et qui ont été variés aussi de mille manières par plusieurs autres observateurs, ne sont certainement que des phénomènes d'interférences. La lumière est diffractée par les bords des diaphragmes qui rétrécissent ou qui modifient l'ouverture de l'objectif; et si, dans ce cas, les franges intérieures peuvent être produites par des corps beaucoup moins étroits ou par des ouvertures beaucoup plus larges, c'est parce que la lumière incidente est plus ou moins *convergente*, au lieu d'être *divergente* ou *parallèle*, comme nous l'avons supposé pour expliquer les principes de diffraction. Il suffira donc de recourir à ces

principes lorsqu'on voudra se rendre compte des effets produits par un diaphragme quelconque, placé dans une position donnée, soit à l'égard de l'objectif d'une lunette, soit à l'égard du miroir d'un télescope; seulement dans ces expériences, s'il arrive que l'image change d'aspect d'un instant à l'autre, on pourra conclure que la scintillation ajoute ses effets aux effets diffingens du diaphragme; et nous verrons dans la météorologie que le phénomène de la scintillation n'est lui-même qu'un phénomène d'interférence.

Explication des anneaux colorés, produits par les lames minces et par les plaques épaisses.

693. *Formation des anneaux colorés dans les lames minces.*

Tous les corps diaphanes paraissent colorés des plus vives nuances lorsqu'ils sont réduits en lames assez minces : cette proposition générale peut être démontrée par une foule d'exemples, entre lesquels nous choisirons seulement les suivants :

Des boules de verre soufflées à la lampe, et gonflées jusqu'à point où elles éclatent, présentent dans tous leurs fragments des couleurs très vives et qui sont changeantes comme celles du plumage de certains oiseaux. Il en est de même des lames de mica, de chaux sulfatée et des autres substances lamellaires qui peuvent être séparées en petits feuillets suffisamment minces.

La diaphanéité n'est pas une condition nécessaire du phénomène; car on voit souvent du verre peu transparent, comme le verre à bouteille, prendre sur sa surface les plus éclatantes couleurs; et il est facile de s'assurer que toutes ces nuances sont produites par de petites lames très minces, qui se sont formées avec le temps et qui conservent leurs couleurs lorsqu'on parvient à les détacher. Tout le monde sait aussi que le fer, la fonte, l'acier et d'autres métaux polis acquièrent au contact de l'air des nuances très marquées de rouge, de jaune, de bleu ou de violet, et que ces nuances sont produites par une couche d'oxide plus ou moins mince, dont la formation est d'autant plus rapide que la température est plus élevée.

Une goutte d'huile qui tombe sur de l'eau claire ou sur de l'eau noircie avec de l'encre, et qui s'étale rapidement en une couche très mince, brille alors de toutes les nuances du spectre; il en est de même d'une couche d'alcool ou de quelque autre liquide qui s'évapore rapidement sur une surface polie; un instant avant de disparaître, elle est assez mince pour être colorée. Les bulles de savon, qui offrent à l'œil des couleurs si brillantes et si variées, ne sont autre chose que des lames minces de liquide; le savon n'y entre pour rien, l'eau pure et tout autre liquide transformé en bulles présente les mêmes apparences.

L'air, les vapeurs et tous les gaz donnent naissance aux mêmes phénomènes. On peut à son aise en superposant, par exemple, deux lames de

verre, et en les pressant l'une contre l'autre; autour des points où leurs surfaces se touchent, on voit paraître une série de petites bandes colorées, qui deviennent des anneaux parfaitement ronds et réguliers, si les surfaces ont elles-mêmes autour du point de contact une courbure symétrique. Les anneaux sont d'autant plus larges et plus étalés que l'épaisseur de la lame d'air augmente moins rapidement à mesure que l'on s'éloigne du point de contact. Ainsi, pour donner un phénomène tout son éclat et toute sa régularité, il suffit de poser un verre bien plan sur une surface légèrement convexe; par exemple, sur une lentille convexe de 50 ou 60 pieds de rayon; on peut encore prendre un objectif achromatique; la petite lame d'air qui est comprise entre la surface concave et la surface convexe a quelquefois une épaisseur assez petite et assez régulière pour que les anneaux soient larges et parfaitement ronds. Un tel système produira des anneaux dans toutes les vapeurs et dans tous les gaz, et, ce qui est encore plus surprenant, il donnera encore des anneaux lorsqu'il sera placé sous la cloche de la machine pneumatique, dans le vide le plus complet que l'on puisse obtenir; d'où il suit qu'une lame mince de vide donne des anneaux, comme les lames minces des différents corps.

594. *Lois expérimentales des anneaux colorés établies par Newton.*

Les phénomènes de coloration dont nous venons de parler ne pouvaient manquer d'exercer au plus haut degré la curiosité des physiciens; mais Newton est parvenu le premier à en reconnaître les conditions et à déterminer les lois très simples auxquelles ils sont soumis. Nous allons successivement rapporter ces lois et les expériences qui servent à les démontrer.

1^o. Dans chaque substance, les couleurs changent avec l'épaisseur de la lame et avec l'obliquité sous laquelle on la regarde; mais, dans tous les cas, elles disparaissent quand la lame est trop mince ou trop épaisse.

Pour faire varier l'épaisseur de la lame qui produit les anneaux, il suffit de poser légèrement la plaque supérieure sur la lentille inférieure, et de presser ensuite avec plus ou moins de force; alors, dans la première position, l'on distinguera une tache centrale blanche ou colorée autour de laquelle se grouperont des anneaux de diverses couleurs; puis, en regardant toujours sous la même obliquité, on verra cette tache centrale changer de couleur à mesure que la pression deviendra plus forte et par conséquent la lame d'air plus mince. A un certain degré de pression, la tache centrale paraîtra noire et plus ou moins large; on peut alors faire l'expérience inverse en soulevant peu à peu la plaque supérieure, pour augmenter graduellement l'épaisseur de la lame d'air; dans ce cas le premier anneau viendra avec sa couleur prendre la place de la tache centrale, puis le deuxième, puis le troisième, etc.

Pour faire varier l'obliquité, il suffit de laisser la plaque supérieure au même degré de pression et d'incliner l'œil plus ou moins; on verra tous les anneaux s'élargir à mesure que l'obliquité augmente, et la tache centrale passer successivement par plusieurs nuances.

Enfin, pour reconnaître qu'une lame trop mince ne donne plus de couleurs, il suffit de remarquer que, dans le cas où la tache centrale est noire, elle est beaucoup plus large que l'étendue physique du contact des surfaces; donc autour du contact il y a une lame d'air trop mince pour donner des couleurs, et l'étendue de cette lame trop mince augmente avec l'obliquité, puisque la tache noire augmente de largeur sans qu'il y ait changement de pression. Cette vérité est encore plus frappante dans les bulles de savon; car si l'on forme ces bulles sur l'eau savonneuse elle-même, et qu'ensuite on les couvre d'une cloche, on pourra les conserver assez long-temps pour que leur sommet devienne complètement noir; et, dans ce cas, il est bien clair que la petite lame d'eau existe au sommet comme ailleurs; mais successivement amincie par l'effet de la gravité, elle arrive à un tel point de minceur qu'elle ne peut plus réfléchir de couleurs.

2^o. Les couleurs simples donnent des anneaux qui sont alternativement brillants et sombres: dans les différentes couleurs, les anneaux du même ordre sont d'autant plus larges que les couleurs qui les forment sont moins réfringibles.

Le système des verres qui donnent les anneaux étant disposé au devant d'une fenêtre et éclairé par la lumière du ciel ou par la lumière blanche des nuées, si l'on vient les regarder au travers d'un verre coloré qui ne laisse passer que de la lumière simple, par exemple, le rouge extrême, on n'observe plus alors autour de la tache centrale que des anneaux alternativement rouges et noirs, formant une série nombreuse. Ces anneaux semblent se presser davantage et devenir plus étroits à mesure qu'ils augmentent de diamètre, c'est-à-dire, à mesure qu'ils s'éloignent davantage du centre. Les verres étant plus ou moins pressés, l'on voit alors la tache centrale passer successivement du rouge au noir et du noir au rouge un grand nombre de fois. On appelle anneaux *brillants du premier ordre*, celui qui entoure la tache centrale, quand elle est noire et que les verres se touchent; puis, anneau du second ordre, celui qui vient après le premier, etc. Mais l'on conçoit que l'anneau du quatrième ordre pourrait être le premier de ceux que l'on voit autour de la tache centrale; il suffirait pour cela que les verres ne fussent pas bien en contact, et que la tache noire ne fût autre chose que l'anneau noir du troisième ordre qui serait venu se placer au centre, à cause de l'écartement des verres.

On peut encore produire des anneaux avec la lumière simple, de la manière suivante: on forme

dans la chambre noire un spectre très allongé; un diaphragme arrête toutes les couleurs du spectre, à l'exception d'une seule qui est projetée sur un tableau blanc; c'est alors cette partie du tableau, devenue successivement rouge, orangée, jaune, etc., qui remplace la lumière du ciel ou celle des nuées; on la regarde par réflexion sur le système de verres destiné à produire les anneaux.

Par l'un ou l'autre de ces moyens l'on peut constater aisément que dans le même système de verres, regardé sous la même obliquité, l'anneau rouge du premier ordre a un diamètre plus grand que l'orangé, celui-ci un diamètre plus grand que le jaune, et qu'il en est de même pour les ordres plus élevés. Il en résulte que, pour trouver les lois de la coloration des anneaux, produits par la lumière blanche, il suffirait de connaître les lois suivant lesquelles se succèdent les anneaux de différents ordres pour chacune des couleurs simples; car il est évident dès à présent que dans les lames minces les nuances se composent, comme dans les franges diffractées, par l'absence de telles ou telles couleurs simples qui se trouvent détruites, tandis que les autres restent apparentes.

3°. Dans une lame mince quelconque, les épaisseurs correspondantes aux anneaux brillants des différents ordres suivent la série des nombres impairs, 1, 3, 5, 7, etc.; tandis que les épaisseurs correspondantes aux anneaux noirs suivent la série des nombres pairs, 0, 2, 4, 6, etc.

Une lame assez mince pour donner des couleurs a, dans ses différents points, des épaisseurs si petites qu'il semble d'abord impossible de les comparer entre elles; mais ce qui est impossible par des moyens directs devient souvent très facile lorsqu'on a recours à des considérations géométriques très simples. Si, par exemple, les surfaces qui limitent la lame mince d'air sont, l'une plane, et l'autre sphérique, et si elles se touchent au point τ (Fig. 717), il est évident que les épaisseurs aa , cb , etc., auxquelles se produisent les anneaux brillants du premier ordre, du deuxième ordre, etc., seront liées aux distances at , ct , etc., des points correspondants a , c , etc., au point de contact τ ; et pour les couleurs que nous avons choisies, il est facile de démontrer que les épaisseurs ab , cb , etc., sont entre elles comme les carrés des distances correspondantes at , ct , etc. Donc, si l'on pouvait trouver les rapports des distances at , ct , etc., il suffirait de les élever au carré pour avoir les rapports inconnus des épaisseurs ab , cb , etc., qui correspondent aux anneaux brillants des divers ordres. Mais, puisque les anneaux sont circulaires, leurs diamètres aa' , cc' , dd' , etc., ont entre eux le même rapport que leurs rayons at , ct , etc. Ainsi, tout se réduit en dernier résultat à mesurer les diamètres des anneaux des divers ordres. Les rapports de leurs carrés seront les rapports des épaisseurs correspondantes de la lame d'air.

Pour mesurer facilement les diamètres des an-

neaux, on les produit avec de la lumière simple, après avoir placé sur le verre convexe un verre plan à faces parallèles; puis, on les regarde d'en haut dans une situation à peu près perpendiculaire, en promenant les deux pointes d'un compas ouvert jusqu'à ce qu'elles correspondent exactement aux deux points opposés d'un même anneau. L'ouverture du compas serait exactement le diamètre cherché, si la lumière ne se réfractait pas en passant du verre dans l'air; mais il est facile de lui faire subir, au besoin, une correction convenable. C'est au moyen de toutes ces précautions que Newton est parvenu à démontrer la loi générale énoncée plus haut.

4°. Dans deux lames de diverses substances, les épaisseurs qui correspondent aux anneaux du même ordre produits avec la même lumière, sont entre elles en raison inverse des indices de réfraction de ces substances.

Cette proposition peut être facilement démontrée pour l'air et un liquide quelconque, par exemple, l'eau. Il suffit pour cela de produire les anneaux dans l'air comme à l'ordinaire, puis d'insinuer entre les verres une petite goutte d'eau; l'action capillaire poussera bientôt le liquide jusqu'au point de contact des verres, et l'on aura en même temps une lame mince d'eau du côté où le liquide est entré, et une lame mince d'air du côté opposé; ces lames auront la même épaisseur, et les anneaux du même ordre seront loin d'être à la même distance du centre; dans l'eau ils seront visiblement plus près et plus serrés les uns contre les autres. Il suffira de les mesurer pour en conclure que les épaisseurs auxquelles se forment les anneaux du même ordre sont en effet entre elles en raison inverse des nombres 4 et 3 qui représentent les indices de réfraction de l'eau et de l'air.

Après avoir déterminé ces lois expérimentales du phénomène des anneaux colorés, Newton parvint encore à mesurer avec une grande précision l'épaisseur absolue de la lame d'air qui correspond à l'anneau brillant du premier ordre pour chacune des couleurs simples. Cette détermination est importante, car nous verrons tout à l'heure comment on en déduit la longueur des ondes lumineuses. Pour l'obtenir, Newton posa sur un verre plan une lentille biconvexe, dont les deux faces avaient été travaillées dans le même bressin; sa distance focale principale était de 83¹/₂ p^{ouces}, 4, et son indice

17

de réfraction —. Par conséquent, le diamètre de

11

la sphère dont ses surfaces faisaient partie, était de 182 p^{ouces} anglais (535). Or, il est facile de voir que l'épaisseur correspondante à un anneau quelconque est égale au carré du rayon de l'anneau, divisée par le diamètre de la sphère du verre convexe; tout se réduit donc à mesurer exactement le diamètre de l'un des anneaux. Newton trouva

1/5 de pouce pour la diamètre du cinquième anneau sombre, et par conséquent, $\frac{1}{25 \times 182}$ ou

$\frac{1}{4550}$ de pouce pour l'épaisseur de la lame d'air.

Cette valeur doit subir deux corrections, l'une dépendante de la réfraction de la lumière au travers du verre supérieur, l'autre dépendante de l'obliquité sous laquelle on regarde les anneaux, celle-ci étant nécessaire seulement lorsqu'en veut réduire l'épaisseur à ce qu'elle est pour l'anneau qui est vu perpendiculairement. Ces corrections faites,

Newton trouva $\frac{1}{17800}$ pour l'épaisseur de la lame

d'air, au milieu de l'anneau sombre du cinquième ordre; et puisque cette épaisseur, en vertu des lois précédentes, se trouve décuple de celle du premier anneau brillant, il en résulte que l'épaisseur absolue de la lame d'air pour le premier anneau brillant est

$\frac{1}{178000}$ de pouce anglais.

Cette valeur appartient à la lumière simple qui forme la limite de l'orangé et du jaune.

Ainsi, pour cette couleur, les anneaux brillants des différens ordres se forment dans l'air aux épaisseurs

1	3	5	7
178000	178000	178000	178000

Et les anneaux sombres aux épaisseurs

2	4	6	8
178000	178000	178000	178000

Les mêmes observations appliquées aux autres couleurs, conduisent au tableau suivant :

Tableau des épaisseurs de la lame d'air correspondantes au milieu de l'anneau brillant du premier ordre pour chacune des couleurs.

Noms des couleurs.	Épaisseurs de l'air en millièmes de pouce anglais.	Épaisseurs de l'air en millièmes de pouce métriques.	Épaisseurs multipliées par 4 en millions de millions.
Rouge extrême.	5,344	161,15	0,45
Orangé rouge.	5,866	148,95	590
Jaune orangé.	5,618	142,70	571
Vert jaune.	5,237	133,01	532
Bleu vert.	4,841	122,97	491
Indigo bleu.	4,513	114,64	458
Violet indigo.	4,323	109,80	430
Violet extrême.	3,997	101,51	406

Enfin Newton avait donné une formule pour exprimer la loi suivant laquelle l'épaisseur augmente avec l'obliquité. Ainsi l'ensemble des résultats qu'il avait obtenus sur le phénomène curieux des anneaux colorés, conduit à la solution de cette ques-

tion générale : le rapport de réfraction d'une substance et son épaisseur étant connue, déterminer la proportion de chacune des couleurs simples qu'elle réfléchit sous une obliquité quelconque, ou réciproquement, la couleur étant connue, on en peut déduire le rapport de réfraction si l'épaisseur est donnée, ou l'épaisseur si le rapport de réfraction est connu.

Nous devons ajouter encore qu'il se forme par transmission des anneaux semblables à ceux qui sont produits par réflexion, seulement ils sont beaucoup plus faibles. Pour les observer, il suffit de placer le système des verres entre l'œil et la lumière; alors, en opérant sur une couleur simple, il est facile de reconnaître que l'épaisseur de la lame, qui paraît noire par réflexion, est celle qui se trouve colorée par transmission, et vice versa. Les anneaux transmis suivent les mêmes lois que les anneaux réfléchis; mais en chaque point d'une lame mince, la teinte transmise est complémentaire de la teinte réfléchie.

595. Des accès de facile réflexion et de facile transmission.

Après avoir établi les lois expérimentales de tous les phénomènes que présentent les lames minces, Newton en avait donné une théorie qui est devenue célèbre sous le nom de *théorie des accès*. Il serait maintenant superflu d'exposer cette théorie dans tous ses détails, parce qu'elle est intimement liée au système de l'émission; mais il nous semble nécessaire d'en faire connaître les principes, pour montrer combien il est difficile de généraliser en même d'exprimer les faits sans y rien mêler d'hypothétique, et pour montrer aussi qu'un système peut conduire à des résultats importants ou à des rapprochemens heureux, même quand il est faux ou incomplet.

Considérant que dans une bulle de savon, dans une lame d'air comprise entre deux verres (Fig. 717), ou dans une lame mince quelconque, éclairée par de la lumière homogène, on voit périodiquement par réflexion des espaces noirs correspondans aux épaisseurs 0, 2, 4, 6, etc., et des espaces brillans correspondans aux épaisseurs 1, 3, 5, 7, etc.; Newton avait exprimé ce fait en disant : la lumière a des *accès de facile réflexion*, car elle se réfléchit quand elle a traversé des épaisseurs 1, 3, 5, 7, etc.; elle a aussi des *accès de facile transmission*, car elle se transmet quand elle a traversé des épaisseurs 0, 2, 4, 6, etc.; et ces deux sortes d'accès sont de même longueur ou de même durée dans le même milieu, puisqu'ils se succèdent périodiquement à des intervalles égaux. Ainsi, en suivant par la pensée un rayon de lumière simple λ (Fig. 718) qui vient de traverser la première surface s d'un milieu pour se propager dans son intérieur de λ vers λ , il faut concevoir que s'il prend en entrant un accès de facile transmission, cet accès ira croissant de λ en λ , où il atteindra son maximum, puis deviendra décroissant de λ en λ ; alors commencera

l'accès de facile réflexion, qui atteindra son maximum en n , et qui sera décroissant de n en c ; puis reviendra un nouvel accès de transmission passant successivement par les mêmes phases ou périodes de c en n , et ensuite un accès de facile réflexion de n en c , etc., etc. L'espace que parcourt le rayon pendant la durée d'un accès est la *longueur de l'accès*; toutes ces longueurs ab , bc , etc., sont égales entre elles.

Cela posé, si le milieu dont la première surface est en as n'a qu'une épaisseur moindre que ab , le rayon pourra passer outre, parce qu'il est dans un accès de facile transmission à l'instant où il touche la seconde surface, et il passera d'autant plus facilement qu'il sera plus près du milieu de son accès de transmission. Ce qui arrive pour une épaisseur moindre que ab , arrive pareillement et par la même raison pour les épaisseurs comprises entre ac et a , ad et ab , etc. Voilà pourquoi une lame mince est noire sous l'incidence perpendiculaire, quand son épaisseur est moindre que la longueur d'un accès, ou quand son épaisseur est égale à deux fois, quatre fois, six fois cette longueur, etc. Au contraire, si l'épaisseur de la lame est égale à une fois, trois fois, cinq fois, sept fois la longueur de l'accès, etc., elle paraîtra vivement colorée, parce qu'à moment où le rayon touche la seconde surface il est dans un accès de facile réflexion et se trouve par conséquent réfléchi.

Dans la même substance, la longueur des accès augmente avec l'obliquité; et dans les diverses substances, elle change en raison inverse des indices de réfraction.

Telle est la théorie ou plutôt l'ingénieuse hypothèse au moyen de laquelle Newton a enchaîné avec une rigueur surprenante tous les phénomènes que présentent les lames minces.

Pendant long-temps on a regardé cette hypothèse comme une vérité physique incontestable; n'est-elle pas, disait-on, l'expression générale d'un fait? n'est-il pas certain que la lumière est alternativement transmise et réfléchie? Cela est vrai, mais en affirmant que la lumière est alternativement transmise et réfléchie, on fait explicitement deux hypothèses, savoir que la lumière est alternativement transmise à certaines épaisseurs et qu'elle est alternativement réfléchie à d'autres épaisseurs; et de plus, on fait encore implicitement une troisième hypothèse, savoir que la première surface n'a aucune part dans le phénomène. Or, nous allons voir qu'il n'y a en effet ni transmission ni réflexion alternatives, et que les anneaux sont produits par le concours de deux réflexions uniformes qui se font à la première et à la seconde surface des lames minces.

500. *Théorie des phénomènes des lames minces dans le système des ondulations.*

Fresnel a présenté cette théorie d'une manière si simple et si concise que je ne fais un devoir de conserver ici ses propres expressions. Il établit

d'abord un principe fondamental sur le sens du mouvement dans les ondes réfléchies, et il explique ensuite la formation des anneaux.

Sur le sens du mouvement dans les ondes réfléchies. — « Lorsqu'un ébranlement se propage dans un milieu d'une élasticité et d'une densité uniformes, il ne revient jamais sur ses pas; et en se communiquant à des tranches nouvelles, il laisse les tranches précédentes dans un repos absolu. C'est ainsi qu'une bille d'ivoire qui vient en frapper une autre de masse égale lui communique tout son mouvement et reste en repos après le choc. Lorsque la seconde bille a plus de masse que la première, la nouvelle vitesse dont celle-ci est animée la porte en sens contraire de son premier mouvement; et lorsque la seconde bille a moins de masse que la première, celle-ci continue à se mouvoir dans le même sens; ainsi les nouvelles vitesses de la première bille, après le choc, sont de signes contraires dans les deux cas. Ce peut aider à concevoir ce qui se passe lorsqu'une onde arrive à la surface de contact de deux milieux élastiques de densités différentes: la tranche infiniment mince du premier milieu, qui touche un second, et que nous pouvons assimiler à la première bille, ne reste pas en repos après avoir mis en mouvement la tranche contiguë du second milieu, à cause de la différence de leur masse, et il y a réflexion; mais la nouvelle vitesse dont la tranche du premier milieu est animée après le choc, et qui se communique successivement aux tranches précédentes du même milieu, doit changer de signe selon que la tranche du second milieu a plus ou moins de masse que celle du premier, c'est-à-dire selon que celui-ci est moins dense ou plus dense que le second. Ce principe important, que M. Young a découvert par les considérations que nous venons d'exposer, résulte également des formules que M. Poisson a déduites d'une analyse savante et rigoureuse. Appliqué à la réflexion de la lumière il nous apprend que selon qu'une onde lumineuse est réfléchie en dedans ou en dehors du milieu le plus dense, la vitesse d'oscillation est positive ou négative. Ainsi tous les mouvements oscillatoires correspondants seront de signes contraires dans les deux cas.

« Cela posé, revenons au phénomène des anneaux colorés, et supposons, pour simplifier les raisonnemens, qu'on observe la lumière réfléchie sous l'incidence perpendiculaire, ou du moins dans une direction qui s'en écarte très peu; considérons un des systèmes d'ondes envoyé par l'objet éclairant sur la première surface de la lame d'air, c'est-à-dire sur la seconde surface du verre supérieur; ce que nous dirons de ce système d'ondes pourra s'appliquer à tous les autres. Au moment où il arrive à la surface de séparation du verre et de l'air, il éprouve une réflexion partielle qui diminue un peu l'intensité de la lumière transmise dans la lame d'air, et fait naître en dedans du premier verre un système d'ondes, dont l'intensité est, comme on

sait, très inférieure à celle de la lumière transmise; en sorte que celle-ci étant fort peu affaiblie par cette première réflexion, produit, en arrivant à la seconde surface de la lame d'air, un second système d'ondes réfléchies d'une intensité presque égale à celle des ondes qui proviennent de la première réflexion; voilà pourquoi leur interférence produit des couleurs si vives dans la lumière blanche, et des anneaux brillants et obscurs si prononcés dans une lumière homogène. Les deux surfaces de la lame d'air étant sensiblement parallèles dans le voisinage du point de contact où se forment les anneaux colorés, les deux systèmes d'ondes suivront la même route; mais celui qui a été réfléchi à la seconde surface, se trouvera en retard relativement à l'autre, et d'une quantité égale au double de l'épaisseur de la lame d'air, qu'il a traversée deux fois. Il faut remarquer en outre qu'il existe entre eux une autre différence, c'est que le premier a été réfléchi en dedans du verre, ou du milieu le plus dense, tandis que l'autre l'a été en dehors du verre inférieur, d'où résulte, d'après le principe établi ci-dessus, une opposition dans les mouvements oscillatoires. Ainsi, lorsqu'en raison de la différence des chemins parcourus, les deux systèmes d'ondes devraient être d'accord, c'est-à-dire exécuter tous leurs mouvements oscillatoires dans le même sens, nous en concluons qu'ils sont au contraire en discordance complète; et réciproquement, lorsque la différence des chemins parcourus indiquera une discordance complète, nous en concluons que leurs mouvements oscillatoires s'accordent parfaitement. Cela posé, il est aisé de déterminer la position des anneaux obscurs et brillants.

» Et d'abord, le point de contact, où l'épaisseur de la lame d'air est nulle, ne produisant aucune différence de marche entre les deux systèmes d'ondes, devrait établir un accord parfait entre leurs vibrations; ainsi, puisque en raison de l'opposition de signe, c'est le contre-pied qu'il faut prendre, leurs vibrations seront en discordance complète, et le point de contact, vu par réflexion, présentera une tache noire. A mesure qu'on s'en éloigne, l'épaisseur de la lame d'air augmente: arrêtons-nous au point où son épaisseur est égale à $1/4$ d'ondulation; la différence des chemins parcourus sera une demi-ondulation, qui répond à une discordance complète, et par conséquent il y aura accord parfait entre les deux systèmes d'ondes; ce sera donc le point le plus éclairé du premier anneau brillant. Lorsque l'épaisseur de la lame d'air sera la moitié d'une ondulation, la différence des chemins parcourus étant égale à une ondulation, qui répond à l'accord parfait, il y aura discordance complète, et ce point sera le milieu d'un anneau obscur. Il est facile de voir en général, par les mêmes raisonnements, que les points les plus noirs des anneaux obscurs répondent aux épaisseurs de la lame d'air, égales à

$$0, \frac{2}{4}d, \frac{4}{4}d, \frac{6}{4}d, \frac{8}{4}d, \text{ etc. ,}$$

et les points les plus éclairés des anneaux brillants aux épaisseurs

$$\frac{1}{4}d, \frac{3}{4}d, \frac{5}{4}d, \frac{7}{4}d, \frac{9}{4}d, \frac{11}{4}d, \text{ etc. ,}$$

d étant la longueur d'une ondulation lumineuse dans l'air; ou, si l'on prend pour unité le quart de cette longueur, les épaisseurs de la lame d'air répondant aux maxima et minima de lumière réfléchie seront représentées par les nombres suivants :

Anneaux obscurs. 0, 2, 4, 6, 8, 10, etc.

Anneaux brillants. 1, 3, 5, 7, 9, 11, etc.

» On voit que cette unité, ou le quart d'une ondulation lumineuse, est précisément la longueur de ce que Newton appelle les *accès des molécules lumineuses*. Ainsi, en multipliant par quatre les mesures qu'il en a données, pour les sept principales espèces de rayons simples, on a les longueurs correspondantes de leurs ondulations. On trouve de cette manière les mêmes résultats qu'en déduisant les longueurs d'ondulation de la mesure des franges produites par deux miroirs, ou des phénomènes variés de la diffraction. (Voyez les tableaux des pages 411 et 435). Cette identité numérique, que M. Young a le premier remarquée, établit entre les anneaux colorés et la diffraction de la lumière, une relation intime, qui avait échappé jusqu'alors aux physiciens guidés par le système de l'émission, et ne pouvait être indiquée que par la théorie des ondulations.

» D'après l'expérience de M. Arago sur le déplacement qu'éprouvent les franges produites par l'interférence de deux faisceaux lumineux, lorsqu'un des deux a traversé une lame mince, nous avons vu que les ondulations lumineuses étaient raccourcies dans cette lame; suivant le rapport du sinus de réfraction au sinus d'incidence, pour le passage de la lumière de l'air dans la lame. Ce principe est général, et s'étend à tous les corps réfringents, de quelque nature qu'ils soient; ainsi, par exemple, la longueur d'ondulation de la lumière dans l'air est à la longueur d'ondulation dans l'eau, comme le sinus de l'angle d'incidence des rayons qui passent obliquement de l'air dans l'eau, est au sinus de leur angle de réfraction. Par conséquent, si l'on introduit de l'eau entre les deux verres en contact qui présentent des anneaux colorés, la lame d'air étant remplacée par une lame d'eau, dans laquelle les ondulations lumineuses deviennent plus courtes, suivant le rapport que nous venons d'énoncer, les épaisseurs de ces deux lames qui réfléchissent les mêmes anneaux, seront entre elles dans le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction, pour le passage de la lumière de l'air dans l'eau. C'est précisément le résultat que Newton avait trouvé par l'observation, en comparant les

diamètres des anneaux produits dans les deux cas, d'où il déduisit, par le calcul, les épaisseurs correspondantes. Cette relation, remarquable entre les phénomènes de la diffraction, de la réfraction et des anneaux colorés, qui ne se rattache en rien à l'hypothèse de l'émission, aurait pu être annoncée d'avance par la théorie des ondulations, d'après laquelle les sinus des angles d'incidence et de réfraction doivent être nécessairement proportionnels aux vitesses de propagation ou aux longueurs d'ondulation de la lumière dans les deux milieux.

« Après avoir rendu compte de la formation des anneaux réfléchis par l'interférence des rayons réfléchis à la première et à la seconde surface de la lame d'air, M. Young a démontré que les anneaux beaucoup plus faibles qu'on voit par transmission, résultent de l'interférence des rayons transmis directement avec ceux qui ne l'ont été qu'après deux réflexions consécutives dans la lame mince, et qu'ils devaient être en conséquence complémentaires des anneaux réfléchis, conformément à l'expérience. Nous croyons inutile de donner cette explication, qui est semblable à la précédente; nous serons seulement remarquer que l'extrême pâleur des anneaux transmis sous l'incidence perpendiculaire, tient à la grande différence d'intensité des deux systèmes d'ondes qui les produisent.

« Nous ne traiterons pas non plus des anneaux réfléchis sous des incidences obliques, et nous nous contenterons de dire que la théorie explique pourquoi leur diamètre augmente avec l'obliquité, et que la formule très simple à laquelle elle conduit représente les faits avec exactitude, du moins tant que les obliquités ne sont pas trop grandes; Insaque les rayons qui pénètrent dans la lame d'air sont très inclinés, les résultats du calcul ne s'accordent plus avec les mesures de Newton. Mais il est probable que cette anomalie tient à ce que les lois ordinaires de la réfraction, d'après lesquelles la formule est calculée, éprouvent quelques modifications dans le passage très oblique des rayons entre deux surfaces aussi rapprochées.

« Nous n'avons considéré jusqu'à présent que les anneaux produits par une lumière simple; mais il est aisé d'en conclure ce qui doit avoir lieu dans la lumière blanche, par des raisonnements analogues à ceux que nous avons déjà faits précédemment pour les franges de l'expérience des deux miroirs. On peut d'ailleurs trouver cette analyse du phénomène exposée avec le plus grand détail dans l'Optique de Newton, qui, le premier, a démontré que l'effet produit par la lumière blanche résultait toujours de la réunion des effets divers des rayons colorés dont elle se compose. »

897. Couleurs produites par les plaques épaisses. — Un rayon solaire entre dans la chambre noire par une ouverture ronde de 4 ou 5 millimètres de diamètre; il tombe sur un miroir concave *na'* (Fig. 719) de verre étamé, qui le renvoie exactement dans la direction d'incidence, et l'on distingue alors

autour de l'ouverture, sur un carton blanc disposé à cet effet, une série d'anneaux très éclatants. Ce phénomène, qui est l'un des plus beaux de l'Optique, a été découvert et observé par Newton.

Quand la lumière incidente est une couleur simple, le rouge, par exemple, les anneaux sont alternativement sombres et rouges, sans aucune autre nuance; on peut alors en compter jusqu'à douze ou quinze, si l'on a pris toutes les précautions convenables pour faire les ténèbres complètes dans le lieu de l'observation. Il est à peine nécessaire d'ajouter que, pour ces expériences, l'on obtient les couleurs simples, soit en décomposant avec un prisme le rayon incident, soit en disposant un verre coloré au devant de l'ouverture.

Quand la lumière incidente est blanche, les anneaux présentent toutes les nuances des anneaux formés par les lames minces; et dans les deux cas, après un certain nombre d'alternatives, on ne distingue nettement que le vert et le rouge.

Ces anneaux prennent leur plus grande intensité, quand la distance du miroir au carton est égale au rayon du miroir, ou, en d'autres termes, quand l'image réfléchie de l'ouverture retombe sur l'ouverture elle-même et lui est précisément égale en grandeur. Pour des distances moindres ou plus grandes entre le miroir et le carton, les couleurs des anneaux paraissent beaucoup plus faibles et finissent même par s'effacer complètement.

Cependant avec un miroir net et bien poli les anneaux sont toujours plus ou moins pâles; et pour leur donner le plus vif éclat qu'ils puissent prendre, il faut tenir un peu la première surface du miroir, soit en soufflant dessus, soit en y projetant quelque poudre très fine, comme de la farine, de la féculé ou de la poudre de lycopode; soit enfin en la couvrant d'une légère couche de lait étendu d'eau qui se sèche et reste adhérent. Cette circonstance singulière avait échappé à Newton; elle fut remarquée par le duc de Chaulnes et ensuite par Herschell.

Lorsqu'on détourne un peu le miroir de la position que nous venons d'indiquer, de telle sorte que l'image réfléchie de l'ouverture tombe à quelque distance de l'ouverture elle-même, par exemple, à 3 ou 4 centimètres au davantage, on distingue encore des anneaux circulaires (Fig. 719 bis), au point d'en compter plusieurs ordres; mais leur centre commun est alors au milieu de la ligne qui joint l'ouverture à son image, et tout autour de ce centre paraît une tache plus ou moins large, qui change d'aspect lorsqu'on porte plus ou moins loin l'image de l'ouverture réfléchie par le miroir. Elle est alternativement sombre et brillante dans la lumière homogène, tandis que dans la lumière blanche elle passe rapidement par une infinité de nuances.

Telles sont les apparences générales de ce phénomène que l'on nomme *phénomène des plaques épaisses*, parce que la grandeur des anneaux dépend

de l'épaisseur du miroir, son rayon de courbure restant le même.

Par un grand nombre d'expériences habilement variées sur des miroirs de différents rayons ou de différentes épaisseurs, et par des mesures précises des anneaux de diverses couleurs, Newton parvint à établir les lois suivantes.

1°. Dans une lumière homogène quelconque, les carrés des diamètres suivent, pour les anneaux brillants, la série des nombres pairs 0, 2, 4, 6, etc., et pour les anneaux sombres, la série des nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc.

2°. Avec un même miroir placé à la même distance, les diamètres des anneaux de même ordre dans les différentes couleurs vont en décroissant, depuis le rouge jusqu'au violet, et leurs rapports sont les mêmes que pour les anneaux formés dans les lames minces.

3°. Les diamètres des anneaux de même couleur et de même ordre formés avec des miroirs de même rayon et de différente épaisseur, sont réciproquement proportionnels aux racines carrées des épaisseurs des miroirs.

Ces lois, purement expérimentales, sont d'une exactitude remarquable. Je les ai autrefois vérifiées avec M. Biot, non seulement sur des miroirs à surfaces concentriques, mais encore sur plusieurs miroirs dont les deux surfaces avaient des rayons de courbure très différents.

Voici une autre manière de produire le phénomène des plaques épaisses; elle fut imaginée par le duc de Chaulnes en 1755 (*Mémoires de l'Académie des sciences*). Au miroir de verre on substitue un miroir de métal, en le plaçant aussi pour que l'ouverture coïncide avec son centre ou à peu près; mais à quelque distance au devant de sa surface on adapte une lame parallèle, telle, par exemple, qu'une lame de verre, de mica ou de chaux sulfatée, avec la précaution de ternir avec du lait l'une ou l'autre de ses faces. Alors on obtient des anneaux parfaitement semblables aux précédents et qui sont par conséquent soumis aux mêmes lois. L'épaisseur du miroir est ici la couche d'air comprise entre la lame transparente et la surface concave du réflecteur, et il est facile de la varier à volonté.

Il se présente enfin un troisième moyen bien plus simple de reproduire encore le même phénomène. J'eus occasion de l'observer en 1816 (*Ann. de phys. et de chim.* 1816). On dispose un miroir concave de métal comme dans l'expérience du duc de Chaulnes, et au lieu d'interposer au devant de sa surface une lame transparente, on y ajoute un écran opaque percé d'une ouverture quelconque, assez petite seulement pour que ses bords rencontrent les rayons incidents et par suite les rayons réfléchis. Alors on distingue des anneaux autour du carton qui est à l'ouverture du volet, comme dans les expériences de Newton et du duc de Chaulnes; seulement ils sont moins éclatants et par conséquent moins nombreux. L'irrégularité de l'ouverture de

l'écran n'altère pas sensiblement la forme circulaire de ces anneaux; ils restent les mêmes pour une ouverture ronde, carrée, triangulaire, ou pour une ouverture en rectangle étroit et très allongé. J'ai même remarqué qu'un simple bord rectiligne présenté au faisceau près des miroirs détermine la formation des anneaux, mais alors on ne distingue nettement qu'une moitié de leur circonférence.

Newton avait su tirer de la théorie des accès une explication des couleurs produites par les miroirs de verre; M. Biot avait étendu cette explication aux couleurs produites par les miroirs métalliques combinés avec une lame transparente, suivant le procédé du duc de Chaulnes; mais pour rattacher à la même théorie les effets que j'avais obtenus en plaçant devant les miroirs des écrans opaques percés de diverses ouvertures, il fallait avoir recours à des hypothèses compliquées et infiniment peu probables. Au contraire, dans le système des ondulations, tous ces phénomènes de même ordre et de même apparence s'expliquent par le même principe: dans les trois cas, les anneaux sont produits par l'interférence des rayons réfléchis sur la surface concave du miroir et partiellement arrêtés, soit par la surface ternie, soit par le bord de l'écran qui se trouve au devant d'elle. Je dois ajouter cependant qu'il reste quelque chose à faire pour analyser, dans tous ses détails, la composition et l'intensité des ondes qui produisent ces couleurs, et je regrette d'autant plus de ne pouvoir entrer ici dans cette discussion que je ne partage pas l'opinion de quelques auteurs qui ont écrit sur ce sujet.

On peut citer encore plusieurs phénomènes de coloration qui dépendent des interférences, et dont jusqu'à présent la théorie a été seulement indiquée d'une manière générale; il m'a semblé nécessaire de décrire au moins ceux de ces phénomènes qui paraissent les plus remarquables, et je vais essayer de le faire en peu de mots.

598. *Couleurs produites par une lame épaisse et une surface plane réfléchissante.*

Une lame de verre *aa* à faces parallèles ou très peu inclinées, ayant plusieurs millimètres d'épaisseur, est disposée (*Fig. 720*) au-dessus d'une lame polie de métal *xt*, et à très peu près parallèlement; au travers de la lame *aa* on regarde sur *xt* l'image réfléchie d'une ouverture faite au volet de la chambre noire, et éclairée seulement par la lumière des nuées; cette image est colorée de nuances plus ou moins vives, dans lesquelles on distingue surtout le rouge et le vert. Il est facile de voir, d'après le système des ondulations, que ces couleurs sont produites par l'interférence des rayons *xyzt* qui passent directement, et des rayons *xyzt* qui ont éprouvé une réflexion dans la plaque. Et pour le vérifier, il suffit de remarquer que les couleurs disparaissent quand on arrête les rayons directs avec un écran, ou quand on arrête les rayons réfléchis dans la plaque en disposant un écran, soit au dehors,

soit en mouillant la surface vers le point 1, où ils viennent se réfléchir. C'est peut-être la plus simple des expériences que l'on puisse faire pour montrer directement l'action mutuelle de deux faisceaux de lumière. J'avais eu occasion de remarquer ce fait, il y a long-temps; mais il a le désavantage de ne pas se prêter facilement à des mesures exactes.

599. *Couleurs produites par deux lames d'égal épaisseur qui sont légèrement inclinées entre elles.*

— On regarde l'ouverture de la chambre noire au travers d'un système de lames égales *as* et *co* (Fig. 721), dont la première est perpendiculaire au rayon incident *as*, tandis que la deuxième est légèrement inclinée. On distingue alors plusieurs images de l'ouverture: la première, dans la direction *as*, est vive et sans couleurs; les autres, qui sont plus ou moins déviées, sont faibles et colorées. Toutes ces couleurs sont produites par l'interférence des rayons qui ont parcouru des chemins inégaux: par exemple, le rayon direct éprouve en *r* sur la seconde lame une réflexion qui donne naissance au rayon *pa cr*, etc. La portion qui pénètre pour se réfléchir en *q* donne naissance au rayon *qawxya*, etc.; ces deux rayons et les autres analogues ont parcouru des chemins qui ne peuvent jamais être absolument égaux, et leur rencontre produit des couleurs. C'est le docteur Brewster qui a observé ce phénomène, et il l'a développé d'une manière intéressante, sans toutefois en donner une théorie précise.

On conçoit à présent que rien n'est plus facile que d'obtenir des couleurs plus ou moins prononcées en combinant de diverses manières des lames à faces parallèles ou à peu près, soit entre elles, soit avec des verres courbes, soit avec des surfaces métalliques. La théorie de ces phénomènes reste à faire; elle sera toujours très compliquée; mais on ne peut pas dire cependant qu'elle doive être absolument sans intérêt pour la science.

600. *Eriomètre du docteur Young.* — Lorsqu'on regarde la flamme d'une bougie au travers d'une petite bouppe de fibres déliées et entrecroisées de mille manières, on voit autour de la flamme des anneaux colorés, imitant à peu près les halos que l'on observe autour du soleil ou de la lune. Des brins de laine, de soie ou de coton, des poils d'animaux, des fils de toute espèce, produisent ce phénomène avec beaucoup d'éclat. Il en est de même encore des poussières fines qui sont étalées sur une lame de verre en couches très minces; la simple humidité de l'haleine déposée sur du verre donne aussi la même apparence, soit par réflexion, soit par transmission. Le docteur Young, qui a le premier observé ces phénomènes avec méthode, s'en est ingénieusement servi pour construire un instrument destiné à mesurer les épaisseurs des fibres déliées ou les diamètres des globules très petits, comme les globules du sang, du lait ou de la fécula. C'est cet instrument qu'il a appelé *ériomètre*.

L'ériomètre se compose d'une plaque circulaire de carton ou de métal noirci, ayant à son centre une ouverture ronde d'environ un demi-millimètre. Autour de cette ouverture, à la distance de 8 ou 10 millimètres, on perce un certain nombre de trous aussi fins qu'il est possible. En plaçant l'œil à quelques centimètres derrière cette plaque, pour regarder une flamme vive, comme celle d'une lampe de Carcelles, on distinguera nettement l'ouverture centrale et les petits trous très fins. Rangés sur une même circonférence, ceux-ci forment le repère sur lequel on doit amener en coïncidence l'un des anneaux des corps déliés soumis à l'expérience. Pour cela on dispose ces corps sur une espèce de voyant qui glisse sur une règle divisée, et ou travers de leur tissu l'on regarde l'ouverture centrale qui paraît alors environnée d'un halo. Si l'anneau que l'on a choisi pour servir à la comparaison des mesures enveloppe la circonférence des repères, on rapproche le voyant, et on l'éloigne dans le cas contraire; puis enfin, quand la coïncidence est bien établie entre les repères et l'anneau, on lit sur la règle la distance du voyant à la première plaque. Le docteur Young admet que les diamètres des corps déliés sont en raison inverse de ces distances. Il suffit par conséquent, d'après cette règle, d'avoir la grandeur de l'un de ces corps pour en déduire celle de tous les autres. Voici quelques-uns des résultats que le docteur Young a obtenus par ce procédé :

Noms des substances.	Millièmes de millimètres.
Globules du lait étendu d'eau.	2,55
Poussière du Boviste (genre de lycoper. don ou vesse-loup).	2,96
Globules du sang de bœuf.	3,83
Id. de souris.	5,82
Id. de l'homme.	6,00
Soie.	10,20
Poil de castor.	11,00
Id. de vigogne.	12,75
Id. de lièvre et de taupe.	13,18
Coton.	16,15
Laine de Saxe très fine.	14,50
Id. ordinaire.	19,55
Id. léonaise.	21,50
Farine de <i>laurestinus</i>	22,10
Laine de mérinos.	22,95
Id. autre.	23,50
Globules de lycopode.	25,00
Grosse laine de Suède.	40,10

Pour mesure absolue, le docteur Young adopte celle des poussières du boviste, déterminée directement par le docteur Wollaston à 1/8560 de ponce anglais. En observant cette substance, le voyant était à une distance de la plaque exprimée par 3 divisions et 1/2 de l'échelle, tandis qu'avec la laine de Suède, par exemple, le voyant était à 40 divisions.

LIVRE HUITIÈME.

SECONDE PARTIE.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA DOUBLE RÉFRACTION.

601. *Phénomène général de la double réfraction.*

— On dit que la lumière éprouve la double réfraction dans un milieu quand, en pénétrant dans ce milieu, un seul faisceau incident donne naissance à deux faisceaux réfractés. Pour distinguer des substances ordinaires celles qui jouissent de cette singulière propriété de diviser un faisceau en deux autres plus ou moins inclinés entre eux, on les nomme *substances doublement réfringentes* ou *substances douées de la double réfraction*. Les liquides et les gaz ne sont jamais doublement réfringents, ou du moins s'ils peuvent l'être parfois, ce n'est qu'à un très faible degré : les solides au contraire peuvent toujours être doués de la double réfraction; mais ils se séparent en deux classes : les uns en sont doués naturellement et d'une manière permanente, les autres ne peuvent en être doués qu'accidentellement, par des actions physiques ou mécaniques, comme par un refroidissement brusque ou par une compression inégale dans les différens sens. Dans la première classe se trouvent tous les corps régulièrement cristallisés qui n'ont pas pour forme *primities* le cube, l'octaèdre régulier ou le dodécaèdre rhomboïdal; dans la seconde classe se trouvent tous les autres corps solides transparents, même les gommés, les résines et les substances gélatineuses. Cependant, s'il est possible de donner à ceux-ci la double réfraction, il n'est pas possible, à ce qu'il paraît, de la faire perdre aux premiers sans altérer leur nature cristalline.

Pour indiquer par quelques expériences le fait de la double réfraction, nous choisirons la *chaux carbonatée*, vulgairement nommée *spath d'Islande*, parce que cette substance n'est pas rare, et parce qu'elle produit énergiquement les phénomènes. Nous choisirons de plus, la forme rhomboïdale représentée dans la *figure 222*, parce qu'elle est à la fois très commune et très commode pour l'effet que nous voulons obtenir. Nous possédons à la Faculté des sciences deux cristaux de cette espèce, ayant chacun 9 centimètres de longueur sur 7 de largeur et 4 de hauteur; mais un rhomboïde de 1 centimètre d'épaisseur suffit pour rendre sensible la bifurcation des rayons.

Supposons premièrement qu'en tenant ce rhom-

boïde au devant de l'œil on regarde contre le jour un objet délié quelconque, par exemple une épingle, alors on en verra deux images, et elles seront d'autant plus écartées l'une de l'autre que l'objet sera lui-même plus éloigné; ensuite, si l'on fait tourner le rhomboïde dans son plan de manière qu'il accomplisse une révolution complète, ces deux images prendront un mouvement relatif régulier, de telle sorte que l'une d'elles viendra deux fois tomber sur le prolongement de l'autre; et il sera facile de reconnaître que ces coïncidences de direction correspondent à deux positions du rhomboïde diamétralement opposées. Si l'objet que l'on regarde avait une certaine largeur, les deux images existeraient encore et présenteraient les mêmes phénomènes d'écart latéral ou de coïncidence; seulement elles empièteraient l'une sur l'autre, et n'offriraient plus une séparation complète.

Secondement, en posant le rhomboïde sur une feuille de papier marquée d'un point noir ou coloré, on aperçoit deux images de ce point et de toutes les autres parties distinctes de la surface du papier, soit que l'on regarde perpendiculairement ou obliquement par la face supérieure du rhomboïde. Un cercle donne pareillement deux images qui sont séparées, qui se touchent ou qui se coupent, suivant que le cercle est plus ou moins grand; c'est même un moyen facile de reconnaître si les images restent également écartées dans toutes les positions qu'elles prennent pendant la révolution du rhomboïde dans son plan, l'œil restant exactement au même point. Un simple trait plus ou moins long, deux traits parallèles, ou deux traits en croix présentent des effets analogues.

Troisièmement, un trait délié de lumière solaire se divise aussi en deux traits d'égale intensité, lorsqu'il traverse les deux faces parallèles du rhomboïde; l'écart absolu du centre des images dépend de l'épaisseur du cristal.

On ne peut douter, d'après ces expériences, que dans la *chaux carbonatée* un faisceau incident ne donne effectivement naissance à deux faisceaux réfractés; c'est Bartholin qui fit, en 1669, la découverte de ce singulier phénomène; Huyghens en détermina ou plutôt en devina les lois, comme nous

le verrons dans un instant; Wollaston confirma par l'expérience toutes les vérités que le génie d'Huyghens avait su tirer de quelques inductions systématiques; Malus, en reprenant les mêmes expériences, découvrit, en 1810, la *polarisation* de la lumière; alors une carrière immense fut ouverte à tous les observateurs; de brillantes découvertes se succédèrent avec une incroyable rapidité, et cette nouvelle branche de la science, due au génie de Malus, devint en peu d'années la plus vaste et la plus importante de l'optique. La polarisation donna des moyens jusqu'alors inconnus pour étudier les propriétés de la lumière, et c'est ainsi que l'on parvint à reconnaître la double réfraction dans une foule de substances où d'abord elle n'avait pas été soupçonnée.

Pour analyser avec plus de facilité les modifications diverses que présente la double réfraction dans les différents corps qui en sont dotés d'une manière permanente, nous remarquerons d'abord qu'il existe entre eux une différence essentielle : les uns sont à un axe, les autres à deux axes.

On va comprendre cette distinction : dans un cristal doué de la double réfraction, il y a toujours une ou deux directions suivant lesquelles un rayon de lumière ne se divise jamais. Ces directions remarquables sont ce que l'on nomme les *axes optiques* du cristal, ou simplement les *axes*; elles ont toujours une certaine symétrie par rapport aux faces naturelles de la forme cristalline.

Les cristaux dans l'intérieur desquels il n'y a qu'une direction d'indivisibilité se nomment *cristaux à un axe*.

Les cristaux dans l'intérieur desquels il y a deux directions d'indivisibilité se nomment *cristaux à deux axes*.

Il ne paraît pas qu'il puisse exister des cristaux réguliers ayant plus de deux axes.

Nous allons étudier successivement les cristaux à un axe et les cristaux à deux axes.

602. *Des cristaux à un axe et de leur section principale.* — Nous prendrions encore pour exemple la chaux carbonatée, qui est un cristal à un axe; la forme primitive de cette substance est un rhomboïde représenté figure 723; c'est-à-dire qu'un cristal de chaux carbonatée peut toujours, quelle que soit sa forme, être regardé comme composé d'une infinité de molécules possédant toutes cette forme rhomboïdale, et disposées parallèlement l'une à côté de l'autre.

Les dimensions absolues de ces molécules ne sont pas déterminées; l'on sait seulement qu'elles sont si petites, qu'il est impossible de les apercevoir individuellement, même au moyen du plus fort microscope. La ligne aa' , qui joint les sommets obtus de l'un de ces rhomboïdes, est ce que l'on appelle son *axe cristallographique*. On conçoit donc que dans un cristal quelconque il y a une infinité d'axes, parce qu'il y a une infinité de molécules; mais tous ces axes sont parallèles, puisque les mo-

lécules sont arrangées parallèlement. C'est pourquoi l'on se contente de dire qu'il n'y a qu'un axe dans un cristal; car il suffit de connaître l'axe d'un seul point pour trouver celui d'un autre point quelconque. Dans un cristal de chaux carbonatée, dont la forme est semblable à la forme primitive (Fig. 723), il est évident que l'axe doit passer par les deux sommets homologues aux sommets a et a' ; dans d'autres cristaux plus composés, la direction de l'axe se détermine par des considérations cristallographiques, dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici; mais il est facile de voir que, dans tous les cas, pour déterminer l'axe il suffit toujours de déterminer la position de l'une des molécules primitives constituantes. Ces notions admises sur l'axe cristallographique, nous pouvons nous occuper de l'axe de double réfraction, qui est le seul que nous ayons à considérer dans la suite.

Le docteur Brewster a établi sur ce point une loi générale qui paraît sans exception : c'est que, dans les cristaux à un axe, l'axe de double réfraction ou l'axe optique coïncide toujours avec l'axe cristallographique.

Pour vérifier ce résultat sur la chaux carbonatée, on peut employer les deux moyens suivants :

1°. On taille une plaque dont les deux faces parallèles ra et $r'a'$ (Fig. 724) soient perpendiculaires à l'axe cristallographique aa' , et l'on fait avec cette plaque les trois expériences que nous avons indiquées précédemment sur le rhomboïde de la figure 722. Alors il est facile de reconnaître que jamais le faisceau ne se divise quand il traverse la plaque perpendiculairement à ses faces, c'est-à-dire quand il traverse le cristal en suivant son axe cristallographique. Mais si le rayon se présente obliquement, il ne pénètre plus en suivant l'axe, et alors il se divise et fait voir deux images.

2°. On taille un prisme de chaux carbonatée, de telle sorte que l'axe cristallographique xx (Fig. 725) soit contenu dans la section sac du prisme, et fasse avec son côté as un angle assez petit pour qu'un certain rayon incident ts puisse pénétrer dans la direction de l'axe; alors ce rayon ne se diviserait pas, et, si le prisme est achromatisé avec un autre prisme de verre ace , le rayon émergent sera simple et sans couleur, comme le rayon incident. Mais d'autres rayons plus ou moins inclinés que ts , ne devant plus pénétrer dans la direction xx de l'axe, éprouveront toujours une division intérieure, et feront voir deux images plus ou moins séparées.

Ainsi, quelle que soit l'obliquité du rayon incident, soit qu'il entre par une face naturelle ou par une face artificielle, il n'éprouve jamais la double réfraction lorsqu'il traverse le cristal en suivant son axe.

Cette vérification peut se faire de la même manière, avec l'un quelconque des cristaux à un axe dont on trouvera la liste un peu plus loin.

Toutes les fois que le rayon de lumière ne se met pas en suivant l'axe du cristal, il se divise en deux autres rayons plus ou moins inclinés l'un à l'autre. De ces deux rayons, il y en a toujours un qui reste soumis aux deux lois générales de la réfraction (525), mais l'autre fait exception à ces lois, c'est-à-dire qu'en général son plan de réfraction ne coïncide pas avec le plan d'incidence, et que les sinus d'incidence et de réfraction cessent d'être dans un rapport constant. Le premier est appelé *rayon ordinaire*, et le second *rayon extraordinaire*.

La marche du rayon ordinaire dans l'intérieur du cristal ne présentera jamais de difficultés, car l'indice de réfraction du cristal pour ce rayon étant une fois connue, sa direction se déduit sans peine des règles de Descartes.

La marche du rayon extraordinaire offre au contraire une assez grande complication; mais nous pouvons dès à présent indiquer deux coupes du cristal dans lesquelles sa direction est très remarquable. Ces coupes sont la *section principale* et la *section perpendiculaire à l'axe*.

1°. *Section principale*. Dans les cristaux à un axe, la *section principale* est le plan mené par l'axe, perpendiculairement à une face quelconque naturelle ou artificielle; ainsi la section principale appartient plutôt à une face qu'à un cristal entier, car chaque face a la sienne. Or, on trouve par expérience que le rayon extraordinaire reste dans le plan d'incidence comme le rayon ordinaire toutes les fois que le plan d'incidence coïncide avec le prolongement de la section principale; dans ce cas particulier, le rayon extraordinaire reste donc soumis à la première loi générale de la réfraction, et il ne fait exception qu'à la seconde. Pour vérifier ce résultat, il suffit de faire tourner dans son plan un cristal à faces parallèles et de suivre le mouvement de l'image extraordinaire; on verra que dans le cercle qu'elle décrit autour de l'image ordinaire elle passe deux fois dans le plan d'incidence, et que ce phénomène arrive quand ce plan coïncide avec la section principale de la face d'entrée.

2°. *Section perpendiculaire à l'axe*. On appelle section perpendiculaire à l'axe, tout plan conçu dans l'intérieur du cristal perpendiculairement à son axe. Or, quand un rayon naturel a une telle section pour plan d'incidence, le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire auxquels il donne naissance ont aussi cette section pour plan de réfraction. Ainsi, dans ce cas, le rayon extraordinaire reste encore soumis à la première loi de réfraction; de plus, il est alors soumis à la seconde loi, c'est-à-dire que dans cette section, et dans celle-là seulement, ses sinus d'incidence et de réfraction conservent un rapport constant pour toutes les obliquités d'incidence. Ce rapport est ce que l'on appelle l'indice de réfraction extraordinaire.

Il était intéressant de comparer entre eux les indices ordinaires et extraordinaires: M. Biot a le pre-

mier fait cette comparaison dans un grand nombre de cristaux, et il est parvenu à ce résultat remarquable: que l'indice de réfraction du rayon extraordinaire est tantôt moindre et tantôt plus grand que l'indice de réfraction du rayon ordinaire. M. Biot appelleit cristaux *répulsifs* ceux qui présentent le premier cas, et cristaux *attractifs* ceux qui présentent le second; mais ces définitions étaient fondées sur des idées systématiques que nous ne pouvons plus adopter aujourd'hui, et nous conviendrons avec M. Brewster de distinguer les cristaux en *cristaux négatifs* et *cristaux positifs*, suivant que l'indice extraordinaire est moindre ou plus grand que l'indice ordinaire. Voici maintenant le tableau des cristaux à un axe, soit négatifs, soit positifs: ceux dont on connaît les indices de réfraction ordinaire et extraordinaire ont été rapportés dans le tableau de la page 363.

Table des cristaux à un axe.

Négatifs.

1. Carbonate de chaux (spath d'Islande).
2. Carbonate de chaux et de magnésie.
3. Carbonate de chaux et de fer.
4. Tourmaline.
5. Rubellite.
6. Corindon.
7. Saphire.
8. Rubis.
9. Émeraude.
10. Beryl.
11. Apatite.
12. Idocrase.
13. Vésuvianite.
14. Mica (de Kariat).
15. Phosphate de plomb.
16. Phosphate de plomb arsénisé.
17. Hydrate de strontiane.
18. Arséniate de potasse.
19. Hydrochlorate de chaux.
20. Hydrochlorate de strontiane.
21. Sousphosphate de potasse.
22. Sulfate de nickel et de cuivre.
23. Cinabre.
24. Mellite.
25. Molybdate de plomb.
26. Octaèdre.
27. Prussiate de potasse.
28. Phosphate de chaux.
29. Arséniate de plomb.
30. Arséniate de cuivre.
31. Néphéline.

Positifs.

1. Zircon.
2. Quartz.
3. Oxyde de fer.
4. Tungstate de zinc.
5. Stannite.
6. Boracite.
7. Apophyllite.
8. Sulfate de potasse et de fer.
9. Sulfate de cuivre et de chaux.
10. Hydrate de magnésie.
11. Glace.
12. Hyposulfate de chaux.
13. Dioptase.
14. Argent rouge.

tal, on conçoit des lignes tracées dans toutes les directions possibles, il est évident qu'un rayon de lumière peut traverser ce point en passant successivement par chacune de ces directions. Dans un cristal à un axe, le rayon ordinaire aura toujours la même vitesse, quelle que soit celle de ces rayons suivant laquelle il se propage, tandis que le rayon extraordinaire aura une infinité de vitesses différentes comprises entre deux limites déterminées. Dans un cristal à deux axes, les vitesses seront changeantes avec les directions, soit pour l'un, soit pour l'autre des deux rayons que la double réfraction développe, et elles seront changeantes suivant des lois différentes. On doit à Huyghens une construction géométrique très élégante, qui donne en même temps toutes les vitesses du rayon extraordinaire, et toutes ses positions par rapport au rayon ordinaire correspondant; mais cette construction ne s'applique qu'aux cristaux à un axe. Les effets incomparablement plus compliqués des cristaux à deux axes restaient inexactement exprimés, soit par la loi d'Huyghens, soit par les modifications plus ou moins ingénieuses que l'on avait essayé de lui donner, lorsque le génie de Fresnel parvint à saisir à la fois, comme dans une seule pensée, la cause de la polarisation, celle de la double réfraction et la loi générale de ces phénomènes dans tous les cristaux. Cette découverte est, sans contredit, l'une des plus admirables découvertes dont la science se soit enrichie.

Pour ne pas anticiper sur ce qui appartient à la polarisation, nous nous contenterons de donner ici les vitesses des deux rayons qui naissent de la double réfraction; ces vitesses peuvent être exprimées en traduisant la construction de Fresnel, et alors elles prennent la forme suivante :

$$v^2 = v^2 + (v'^2 - v^2) \sin^2 \frac{1}{2} (\lambda' - \lambda)$$

$$v'^2 = v^2 + (v'^2 - v^2) \sin^2 \frac{1}{2} (\lambda' + \lambda)$$

v Vitesse ordinaire.

v' Vitesse extraordinaire.

λ Angle du rayon avec le premier axe.

λ' Angle du rayon avec le deuxième axe.

- a { Pour les cristaux à un axe, vitesse ordinaire.
Pour les cristaux à deux axes, vitesse constante dans la section perpendiculaire à la ligne supplémentaire (page 444).
 b { Pour les cristaux à un axe, vitesse extraordinaire.
Pour les cristaux à deux axes, vitesse constante dans la section perpendiculaire à la ligne moyenne (page 444).

Pour mieux faire comprendre ces formules, nous les discuterons pour quelques cas particuliers.

1°. *Cristaux d'un axe.* — Lorsque les deux axes se réduisent à un seul, les angles λ et λ' que le rayon fait avec chacun des axes se réduisent pareillement à un seul; c'est-à-dire que l'on a $\lambda = \lambda'$.

Ainsi, pour les cristaux à un axe on a simplement :

$$v^2 = v^2$$

$$v'^2 = v^2 + (v'^2 - v^2) \sin^2 \lambda$$

La première équation exprime que la vitesse ordinaire v est constante dans toutes les directions et toujours égale à v .

La seconde équation indique que la vitesse extraordinaire v' dépend de l'angle λ , que le rayon extraordinaire fait avec l'axe.

Quand ce rayon est dans la section perpendiculaire à l'axe, on a $\lambda = 90^\circ$, et $\sin^2 \lambda = 1$, d'où il résulte

$$v' = v'$$

ce qui montre, comme nous l'avons indiqué page 442, que dans cette section la vitesse extraordinaire est constante.

Ces deux valeurs v et v' sont les deux limites de la vitesse extraordinaire; l'une est son maximum et l'autre son minimum.

Quand le rayon se meut parallèlement à l'axe, ou a $\lambda = 0$ et $\sin^2 \lambda = 0$. D'où il résulte

$$v' = v$$

Ainsi dans cette direction, et dans celle-là seulement, la vitesse extraordinaire devient égale à la vitesse ordinaire.

Dans le système ondulatoire que nous avons adopté, l'indice de réfraction n'est autre chose que le rapport direct des vitesses, et, si nous représentons par 1 le vitesse de la lumière dans le vide, —

sera l'indice de réfraction du rayon extraordinaire dans la section perpendiculaire à l'axe, tandis que — sera l'indice de réfraction du rayon ordinaire;

le caractère des cristaux négatifs sera donc

$$\frac{1}{n'} < \frac{1}{n} \text{ ou } n' > n$$

et celui des cristaux positifs

$$\frac{1}{n'} > \frac{1}{n} \text{ ou } n' < n$$

Dans le premier cas, $n' = n$, coefficient de $\sin^2 \lambda$, est positif, et le maximum de v' correspond au cas où l'on a $\sin^2 \lambda = 1$ ou $\lambda = 90^\circ$, tandis que le minimum correspond à $\sin^2 \lambda = 0$; en $\lambda = 0$. Dans le second cas, au contraire, $n' = n$ est négatif, et le minimum de v' correspond à $\lambda = 90^\circ$, et le maximum à $\lambda = 0$.

C'est donc toujours en se propageant suivant l'axe et dans la section perpendiculaire à l'axe, que le rayon extraordinaire acquiert sa moindre et sa plus grande vitesse; mais pour les cristaux négatifs, le maximum a lieu dans la section perpendiculaire à l'axe, et le minimum dans le sens de l'axe, et c'est le contraire pour les cristaux positifs.

2°. *Cristaux à deux axes.* — Quand le rayon est compris dans la section perpendiculaire à la ligne supplémentaire rs (Fig. 726), il est évident qu'il fait toujours des angles égaux avec chacun des axes rx et rx' ; ainsi $\lambda = \lambda'$,

$$\text{Sin. } \lambda / 2 (\lambda' - \lambda) = 0$$

et λ' se réduit à

$$v' = v \text{ ou } v = v'$$

Ainsi, comme nous l'avons annoncé, λ est dans ce cas l'expression de la vitesse, et c'est pour cette raison que nous appellerons *vitesse ordinaire* toutes celles qui sont données par les diverses valeurs de v .

Au contraire, quand le rayon se meut dans la section perpendiculaire à la ligne moyenne rs , la somme des angles λ et λ' est toujours égale à deux angles droits, et $\text{Sin. } \lambda / 2 (\lambda + \lambda') = 1$, d'où il résulte

$$v' = 0 \text{ ou } v = v'$$

C'est pourquoi nous avons dit que v' représente la vitesse du rayon dans cette section, et nous appellerons aussi *vitesse extraordinaires* toutes celles qui sont données par les valeurs de v' .

Quand v' est plus grand que v , le *minimum* de la vitesse ordinaire a lieu pour $\lambda' = \lambda$, ou pour

$$v = v'$$

et le *maximum* a lieu lorsque $\lambda' - \lambda$ est le plus grand possible, ce qui arrive dans le plan des axes.

Le *minimum* devient *maximum* et *vice versa* lorsque v est plus grand que v' .

Les *maximum* et *minimum* du rayon extraordinaire arrivent aussi pour

$$v' = v'$$

et par conséquent pour le cas où le rayon est dans le plan des axes, mais ils changent pareillement de rôle lorsque v' est plus grand ou plus petit que v .

On peut encore remarquer que dans tous les cas la différence des carrés des vitesses est exprimée par la formule

$$v'^2 - v^2 = (v'^2 - v^2) \text{ Sin. } \lambda' \text{ Sin. } \lambda.$$

c'est-à-dire que les deux rayons ordinaires et extraordinaires ayant une direction commune, les différences des carrés de leurs vitesses sont proportionnelles au produit des sinus des angles que chacun d'eux fait avec les deux axes. Cette remarque avait été faite par M. Brewster et par M. Biot, avant que Fresnel eût indiqué la loi simple qui embrasse le phénomène dans toute son étendue.

605. *Diverses expériences de la double réfraction.* Nous rapporterons ici quelques-unes des nombreuses expériences que l'on peut faire pour habituer l'esprit à suivre les mouvements de la lumière dans les cristallins doués de la double réfraction.

1°. *Expérience de Monge.* On tient un rhomboïde horizontalement, et en plaçant l'œil très près de la surface supérieure (Fig. 727); on regarde la dou-

ble image d'un objet a placé à quelque distance au-dessous de la surface inférieure. Supposons, pour plus de simplicité, que la section principale du rhomboïde soit tournée de manière que ces deux images soient, l'une à droite, et l'autre à gauche de l'observateur. Alors, en promenant une carte ou-dessous du rhomboïde, on voit avec surprise que si elle passe de gauche à droite, c'est l'image de droite qu'elle cache la première, et *vice versa*. Ce phénomène tient à ce que les faisceaux on' et $\lambda x'$, qui apportent dans l'œil rr' l'impression des images ordinaires et extraordinaires, se *croisent* dans l'intérieur du cristal, à cause de leur inégale réfrangibilité et de leur inégale incidence sur la surface d'entrée rr' . Le faisceau extraordinaire provenant de xxr' n'arrive pas à l'œil, non plus que le faisceau ordinaire provenant de axx' .

2°. *Expériences sur le lieu apparent des images.*

En plaçant l'œil très près de la surface supérieure d'un rhomboïde, et en regardant des points qui sont très près de la surface inférieure, soit au dehors comme des marques faites sur du papier, soit au dedans comme des taches particulières à la masse du cristal, on reconnaît que, des deux images d'un même point, l'une paraît sensiblement plus rapprochée que l'autre, et que les différences changent, avec l'épaisseur du cristal, avec l'écliquité sous laquelle on regarde, et même avec le sens dans lequel se trouve placée la section principale, par rapport à l'œil. Il est facile de se rendre compte de ces apparences: un objet a , vu dans l'eau (Fig. 728), paraît relevé et rapproché de l'œil, parce que ses rayons se brisent au sortir de l'eau, et parce qu'ils forment un cône plus ouvert dont le sommet est par conséquent moins éloigné. Plus le liquide est réfringent, plus l'image de l'objet est relevée et rapprochée. Puisque le carbonate de chaux a deux réfractions différentes, les deux images du même point doivent être inégalement déviées et inégalement rapprochées, et dans cette substance, c'est l'image extraordinaire qui est la moins rapprochée, parce que l'indice extraordinaire est moindre que l'indice ordinaire. Dans le quartz on observe le phénomène inverse, parce que l'indice extraordinaire est le plus grand.

3°. *Expériences des rhomboïdes superposés.* Lorsqu'on superpose deux rhomboïdes pour regarder des objets au travers de leur double épaisseur, on observe les phénomènes suivants: quand les sections principales de ces deux rhomboïdes sont parallèles ou perpendiculaires, on ne voit que deux images de l'objet, comme si le rhomboïde était seul; mais on en voit quatre images diversement intenses dans toutes les autres positions relatives des deux sections principales. Nous devons conclure de là que les deux rayons ordinaire et extraordinaire qui sortent d'un premier rhomboïde ont une propriété que les distingue essentiellement d'un rayon de lumière naturelle, puisque celui-ci donne toujours deux images égales en traversant

un rhomboïde. Pour mieux analyser cette propriété distinctive on peut employer la lumière solaire et placer le second rhomboïde assez loin du premier pour agir séparément sur les rayons ordinaires et extraordinaires, auxquels il a donné naissance. Alors on reconnaît, 1^o que si les sections principales sont parallèles, le *rayon ordinaire* du premier cristal se réfracte tout entier *ordinairement* dans le second, et le *rayon extraordinaire* se réfracte aussi tout entier *extraordinairement*; 2^o que si les sections principales sont perpendiculaires, le *rayon ordinaire* du premier cristal se réfracte tout entier *extraordinairement* dans le second, tandis que le *rayon extraordinaire* se réfracte tout entier *ordinairement*; 3^o que si les sections principales font entre elles un angle de 45°, chacun des rayons ordinaire et extraordinaire du premier cristal, se divise dans le second en deux faisceaux égaux; 4^o que dans les autres situations relatives des deux sections principales, chacun des faisceaux du premier cristal donne naissance à deux faisceaux inégaux dans le second.

Dans toutes les expériences de cette espèce, on peut avec avantage substituer aux rhomboïdes des prismes de chaux carbonatée ou de cristal de roche, achromatisés avec du verre; c'est ce que nous appellerons des *prismes bi-réfringens*. Ils doivent être travaillés de manière que l'axe optique soit parallèle ou perpendiculaire à l'arête du sommet; alors en donnant aux faces latérales des inclinaisons convenables, on obtient des séparations plus ou moins grandes entre les deux images, et rien n'est plus facile que d'observer et d'analyser chacune d'elles en particulier; mais on conçoit que jamais les deux images ne peuvent être à la fois complètement achromatisées, puisqu'elles proviennent de puissances réfractives différentes. La figure 729 représente en grandeur naturelle un petit prisme bi-réfringent de chaux carbonatée. L'axe optique est à peu près parallèle à l'une des faces, et perpendiculaire à l'arête; l'angle que les deux images sentendent dans l'œil est assez grand pour la plupart des expériences.

6^o. *Expériences de réflexion à la seconde surface des corps doublement réfringens.* Quand un faisceau de lumière se réfléchit à la seconde surface d'un corps doué de la double réfraction, il présente des phénomènes particuliers qui tiennent aux propriétés dont nous venons de parler. En arrivant à cette seconde surface, le faisceau est ordinaire ou extraordinaire, puisqu'il vient de traverser un cristal, et après la réflexion, il se trouve dans le même cas qu'un faisceau ordinaire ou extraordinaire qui se présente pour pénétrer dans un second cristal. De là les différentes apparences des images réfléchies, suivant les positions relatives de l'œil, du plan de réflexion, et de la section principale du cristal. Tous ces effets peuvent être facilement analysés au moyen du prisme bi-réfringent.

608. *Double réfraction du verre comprimé.* —

Après avoir exposé les principaux phénomènes de la double réfraction dans les cristaux, nous devons donner une idée des causes accidentelles qui peuvent agir sur la plupart des corps diaphanes pour les rendre aussi doublement réfringens. Ces indications n'auraient pas seulement pour objet de nous faire connaître des faits nouveaux; elles serviraient encore à nous montrer d'une manière évidente que la division des rayons dans les corps doublement réfringens est produite par l'inégale élasticité que possède l'éther dans les différentes directions, et que cette inégale élasticité résout elle-même de la forme des molécules, de leur distance relative et de leur arrangement particulier. Voici l'expérience que Fresnel a imaginée pour démontrer cette vérité importante.

Quatre prismes rectangulaires de verre A, a, G, g, parfaitement égaux entre eux, sont posés à côté l'un de l'autre sur un plan horizontal, par leur face hypothénuse (Fig. 730). D'un côté et de l'autre, on applique contre les quatre bouts des bandes de carton, et sur elles des bandes très rigides d'acier; puis on les comprime très fortement dans un état convenable, de telle sorte que la compression s'exerce dans le sens de l'axe des prismes pour en diminuer la longueur. Pendant que le verre est ainsi maintenu dans un état forcé, on ajuste trois autres prismes rectangulaires x, x, o, et deux prismes de 45°, a, k, pour compléter un parallépipède allongé dont les faces extrêmes s'étaient parallèles; les faces latérales de tous ces derniers prismes sont collées aux faces latérales des premiers avec du mastic en larmes, afin d'éviter les réflexions partielles.

Ce système, ainsi composé, est doué de la double réfraction. Une petite mire, placée à 1 mètre du côté de la face s', par exemple, est vue double par l'œil qui regarde contre la face s; et l'écart des deux images peut être de 1 millimètre ou même davantage. On peut du reste s'assurer que chacun des deux faisceaux jouit bien de tous les caractères des faisceaux doublement réfractés. Or, il est bien évident que dans ce cas la double réfraction est produite par l'inégale élasticité de l'éther, dans le verre comprimé et dans celui qui ne l'est pas.

Nous verrons à la fin de la polarisation beaucoup de phénomènes très curieux qui résultent d'une véritable double réfraction dans un grand nombre de corps diaphanes non cristallisés; mais si cette double réfraction est assez forte pour produire de vives couleurs, elle est trop faible pour être observée directement.

Pour compléter l'exposition des principaux phénomènes qui appartiennent exclusivement à la double réfraction, nous indiquerons encore ici comment le principe de la division des rayons peut être utilement appliqué à la mesure des petits angles; c'est Rochon qui a réalisé le premier cette ingénieuse application, en 1777, dans un instru-

ment que l'on appelle aujourd'hui *micromètre à double image* ou *lunette de Rochon*.

607. *Micromètre à double image.* — Cet instrument donne immédiatement l'angle sous lequel on voit un objet, et fournit par conséquent la grandeur de cet objet quand on connaît sa distance, ou sa distance quand on connaît sa grandeur.

Le micromètre à double image se compose d'une lunette ordinaire et d'un système de deux prismes en cristal de roche, égaux, rectangulaires et opposés. L'angle de ces prismes, leur ajustement et leur mobilité dans l'intérieur de la lunette déterminent l'effet que l'on peut en obtenir pour la mesure des angles.

Le système des deux prismes est représenté en coupe dans la figure 731. Dans le premier, ass , les faces ont été taillées de manière que la face ss , qui est tournée vers l'objet, soit perpendiculaire à l'axe, et dans le second, $as's'$, les trois faces latérales as' , ss' et aa' sont, au contraire, parallèles à l'axe. Ces deux prismes, réunis par une couche légère de mastie en larmes, forment une plaque dont les faces ss et as' sont exactement parallèles.

Supposons d'abord que l'on regarde perpendiculairement au travers de ce système un objet assez éloigné pour donner des rayons sensiblement parallèles, et considérons l'un de ces rayons incidents, tel que LI (Fig. 731); ce rayon traversera le prisme ass sans se réfracter et sans se diviser, parce qu'il est à la fois perpendiculaire à la face d'entrée et parallèle à l'axe; mais dès qu'il arrivera en as , à la jonction des deux prismes, il donnera naissance à deux rayons, l'un ordinaire, qui suivra sa marche sans se dévier, et viendra sortir en so , et l'autre extraordinaire, qui sera brisé en se rapprochant de la normale rq , parce que le cristal de roche est positif; celui-ci tombant obliquement sur la face de sortie as' , se réfractera de nouveau en repassant dans l'air, et prendra la direction rs . Ce que nous venons de dire du rayon LI s'appliquant à tous les autres rayons incidents, il est clair que l'œil placé en a verra une double image de l'objet, car s'il ne reçoit pas le rayon ordinaire provenant de LI , il reçoit un autre rayon ordinaire KL ; ou, en d'autres termes, il y a deux faisceaux émergents, l'un parallèle à so , l'autre parallèle à rs , et dès que l'œil se place en un des points où ces faisceaux se croisent, il reçoit de chacun d'eux une impression particulière et distingue deux objets.

Il est facile de calculer, dans ces circonstances, l'angle que forment entre eux les deux faisceaux ordinaire et extraordinaire; pour cela nous appellerons (Fig. 732) :

1 l'angle d'incidence sur la face de jonction as des deux prismes,

α l'angle de réfraction du rayon extraordinaire qui se forme dans le prisme $as's'$,

α' l'angle d'incidence qu'il forme sur la face de sortie as' ,

ε l'angle d'émergence.

Nous savons d'ailleurs que le rapport de réfraction dans le cristal de roche est

1,5484 pour le rayon ordinaire,
1,5582 pour le rayon extraordinaire.

Ainsi quand le rayon extraordinaire passe du premier prisme dans le second, le rapport des sinus est

$$\frac{1,5582}{1,5481} = 1,0063.$$

$$\text{On a donc : } \frac{\sin. i}{\sin. r} = 1,0063, \text{ et } \frac{\sin. \varepsilon}{\sin. i'} = 1,5582.$$

Mais, si l'on désigne par λ l'angle réfringent ass ou $as's'$ des prismes, il est facile de voir que l'on a

$$\begin{aligned} 1^\circ & \dots \dots \dots i = \lambda \\ 2^\circ & \dots \dots \dots i' = \lambda - \alpha \end{aligned}$$

Ainsi les deux équations précédentes deviennent

$$\frac{\sin. \lambda}{\sin. \alpha} = 1,0063, \text{ et } \frac{\sin. \varepsilon}{\sin. (\lambda - \alpha)} = 1,5582$$

D'où il est facile de tirer la valeur de l'angle ε quand on connaît l'angle réfringent λ .

Voici un tableau des valeurs de α , de $\lambda - \alpha$, et de ε correspondantes à diverses valeurs de λ .

Angles réfringents ou prismes en degrés de λ .	Angles de réfraction dans le cristal de roche pour un rayon ordinaire de λ .	Angles de réfraction pour le rayon extraordinaire de $\lambda - \alpha$.	Angles d'émergence ou angles de ε .
30	29° 47' 30"	15° 30"	19° 30"
35	34 44 50	15 10	25 40
40	39 41 50	18 10	28 20
45	44 38 30	21 30	33 30
50	49 34 20	25 40	40 00
55	54 29 20	30 40	47 50
60	59 23 0	37 0	57 40

On peut juger par ce tableau qu'en augmentant de plus en plus l'angle réfringent des prismes, on obtient des valeurs de plus en plus grandes pour l'angle que forme le faisceau extraordinaire avec le faisceau ordinaire, et que pour un angle réfringent de 60° on arrive presque à obtenir un angle d'émergence de 1°.

Ces résultats nous indiquent la limite des angles qu'il est possible de mesurer par ce moyen.

Voyons maintenant comment le système des prismes s'adapte dans une lunette ordinaire pour former un micromètre à double image.

Soit as' (Fig. 733) l'objectif d'une lunette, s son foyer principal, et sr l'image d'un objet éloigné; c'est entre cette image et l'objectif que le système des prismes est disposé pour s'y mouvoir parallèle-

ment à lui-même et s'arrêter dans un point quelconque de cet intervalle.

La lumière convergente qui le traverse donne naissance à deux faisceaux, l'un ordinaire, l'autre extraordinaire; le premier vient former l'image πr , comme si les prismes n'existaient pas, et le second va former l'image extraordinaire $\pi' r'$, qui est très sensiblement égale à πr . La situation relative de ces deux images est tout-à-fait dépendante du point où l'on arrête les prismes, entre le foyer r et l'objectif a ; car l'angle des deux faisceaux ordinaire et extraordinaire étant constant pour un même système de prisme et déterminé conformément à la table précédente, il est évident que, si les prismes sont très près de l'objectif, les deux images se dédageront l'une de l'autre le plus possible, et qu'au contraire elles se rapprocheront et se superposeront de plus en plus, à mesure que les prismes s'éloigneront de l'objectif pour se rapprocher du foyer. (Fig. 733 bis). Par conséquent si l'angle des faisceaux ordinaire et extraordinaire est plus grand que l'angle $r c \pi$ formé par les deux pinceaux extrêmes qui viennent aux bords opposés de l'image, il y aura toujours une certaine position des prismes pour laquelle les deux images seront exactement en contact. C'est là la position de l'observation et la condition sans laquelle l'instrument ne peut donner la mesure de l'angle visuel de l'objet. En effet,

Désignons par v l'angle visuel $r c \pi$, qu'il s'agit de déterminer;

Par r la distance focale principale $c f$,

Par π la grandeur de l'image πr ,

Par α l'angle $r a \pi$ des deux faisceaux ordinaire et extraordinaire,

Par π la distance $r \pi$ des prismes aux images.

Le triangle rectangle $r c \pi$ donne :

$$\text{Tang. } v = \frac{\pi}{r}$$

Le triangle rectangle $r a \pi$ donne :

$$\text{Tang. } \alpha = \frac{\pi}{r}$$

Il en résulte :

$$\text{Tang. } v = \frac{\pi \text{ Tang. } \alpha}{r}$$

Par conséquent, tout se réduit à observer la valeur de π , qui est la seule quantité variable, et à déterminer une fois pour toutes la valeur de $\text{tang. } \alpha$, divisée par r , qui est constante dans le même instrument, et qui dépend de l'angle des prismes et de la distance focale de l'objectif.

1°. Pour observer la valeur de π , il suffit de marquer sur le tube de la lunette le point o , c'est-à-dire le point d'où les distances doivent être comptées; pour cela on observe un petit objet très éloigné et nettement terminé, par exemple, la tige d'un paratonnerre, et l'on fait mouvoir le prisme jusqu'à

l'instant où les deux images de cette tige se recouvrent exactement : la position du prisme est alors le point de départ d'où l'on doit compter les distances.

2°. Pour déterminer $\text{tang. } \alpha$ divisé par r , on pourrait séparément trouver la valeur de r ou la distance focale principale de l'objectif, et la valeur de $\text{tang. } \alpha$ d'après l'angle des prismes, et les indices de réfraction ordinaire et extraordinaire du cristal de roche; mais il est plus simple et plus sûr d'observer une mire éloignée dont on connaît la grandeur et la distance, et par conséquent l'angle visuel. Si le diamètre de cette mire est, par exemple, de 582 millimètres, et qu'elle soit éloignée de 100 millimètres, son angle visuel est de $20'$; car il est l'angle dont la tangente est

$$\begin{aligned} 0.582 \\ \hline = 0.00582; \\ 100 \end{aligned}$$

ce qui donne à très peu près $20'$. On observe donc cette mire en faisant mouvoir les prismes jusqu'au contact des images, et l'on marque $20'$ sur le point correspondant du tube de la lunette.

Au moyen du point zéro et du point $20'$ il est facile d'achever la graduation, car il suffit de diviser en vingt parties égales l'intervalle compris entre les points, et de continuer les divisions sur le tube jusqu'au près de l'objectif. On peut encore subdiviser chacune de ces parties en plusieurs autres, pour avoir des fractions de minutes. La figure 734 représente le micromètre complet.

Il ne restait rien à faire, si l'on ne voulait employer cet instrument qu'à la mesure des angles; il n'y aurait plus qu'à diriger la lunette vers l'objet dont on veut avoir l'angle visuel, et à faire mouvoir les prismes pour amener exactement les images au contact; vis-à-vis le point où les prismes sont arrêtés, on lirait l'angle cherché.

Mais, lorsqu'on veut employer le micromètre à double image à déterminer aussi la distance d'un objet dont on connaît la grandeur, on grave encore sur le tube une seconde série de nombres dont chacun correspond à l'un des angles précédents. A côté de $1'$ on écrit 3438, à côté de $2'$, 1719; de $3'$, 1146; de $4'$, 859, etc. C'est par ces nombres qu'il faut multiplier la grandeur d'un objet pour avoir sa distance. On les obtient en divisant l'unité par la tangente de l'angle correspondant. Supposons, par exemple, qu'en observant un homme de 5 pieds à une certaine distance on doive, pour mettre les deux images en contact, amener les prismes au point où se trouve écrit $4'$ sur le tube, ce sera une preuve que l'angle visuel est alors $4'$, et le nombre 859, qui se trouve écrit à côté de $4'$, montre qu'il faut multiplier la grandeur connue de l'objet par 859 pour avoir sa distance. L'homme que l'on observe est donc alors éloigné de 859×5 ou 4295 pieds.

On peut enfin, lorsqu'on connaît la distance d'un

objet, déterminer sa grandeur, il suffit pour cela de mettre les deux images en contact et de lire le nombre correspondant; la distance divisée par le nombre donne la grandeur.

Le micromètre à double image a été souvent employé en mer pour apprécier la distance des bâtimens qui sont en vue, car on peut toujours trouver sur un bâtiment quelques objets dont les

grandeurs soient connues; il a été employé à la guerre avec le même succès; et parmi les applications scientifiques qui en ont été faites, la plus belle et la plus importante est celle que l'on doit à M. Arago : car c'est au moyen de cet instrument que M. Arago a mesuré, avec une précision jusqu'alors inconnue, les diamètres apparents des planètes.

CHAPITRE II.

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX DE LA POLARISATION.

608. *Polarisation par réflexion.* — Lorsqu'un pinceau de lumière a été réfléchi sur une plaque de verre en faisant avec la surface un angle de $35^{\circ} 25'$, on dit qu'il est *polarisé*, parce qu'il présente alors des propriétés singulières que l'on n'observe jamais dans la lumière naturelle. Parmi ces propriétés, nous indiquerons seulement ici les trois suivantes, qui sont caractéristiques.

1°. Il ne donne qu'une seule image en passant au travers d'un prisme bi-réfringent, quand la section principale de ce prisme (605) est parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion; tandis qu'il donne deux images plus ou moins intenses dans toutes les autres positions.

2°. Il n'éprouve aucune réflexion en tombant sur une seconde lame de verre, sous le même angle de $35^{\circ} 25'$, quand le plan d'incidence sur cette seconde lame est perpendiculaire au plan d'incidence sur la première, tandis qu'il se réfléchit partiellement dans d'autres plans et sous d'autres incidences.

3°. Il est incapable de se transmettre perpendiculairement au travers d'une plaque de tourmaline dont l'axe est parallèle au plan de réflexion, tandis qu'il se transmet avec une intensité croissante à mesure que l'axe de la tourmaline approche d'être perpendiculaire au plan de réflexion.

Pour démontrer ces vérités par l'expérience, on peut employer l'appareil qui est représenté dans les figures 735, 736, 737 et 738.

(Fig. 735). rr' . Tube de cuivre semblable à un tuyau de lunette; il est porté sur un pied.

aa' . Diaphragme dans l'intérieur du tube.

cc' . Réflecteur en verre; il est en verre noir pour éviter la réflexion à la seconde surface; il peut être fixe ou mobile; dans le premier cas on l'arrête dans une position telle que l'axe du tube fasse avec lui un angle de $35^{\circ} 25'$.

(Fig. 736). xx' . Anneau qui peut entrer à frottement doux sur l'extrémité du tube précédent, et tourner librement de droite à gauche ou de gauche

à droite; cet anneau est attaché à la monture du prisme rr' .

rr' . Prisme achromatique donné de la double réfraction; il est composé d'un prisme de spath d'Islande ou de cristal de roche, et d'un prisme de verre qui sert à l'achromatiser.

(Fig. 737). xx' . Anneau semblable au précédent; il porte deux traverses x , x' , terminées par des pivots a et a' , autour desquels la glace rr' est mobile.

(Fig. 738). xx' . Anneau semblable au précédent, il porte la monture d'une plaque de verre vv' à faces parallèles, et sur cette plaque se trouve collée la plaque mm' de tourmaline dont les deux faces sont parallèles à l'axe.

Le tube rr' (Fig. 735) étant disposé convenablement pour que la lumière du ciel ou la lumière blanche des nuées tombe sur le réflecteur cc' , il est évident, d'après ce que nous avons dit, que le faisceau réfléchi suivant l'axe du tube fait un angle de $35^{\circ} 25'$ avec la surface réfléchissante; pour observer ce faisceau on adapte l'anneau xx' (Fig. 736) à l'extrémité du tube, et l'on regarde au travers du prisme achromatique rr' , l'image du diaphragme aa' . Cette image pourra d'abord paraître double, comme si la lumière qui la donne n'avait pas été réfléchie et n'était pas polarisée; mais en faisant tourner l'anneau xx' , et par conséquent le prisme, on trouvera quatre positions rectangulaires pour lesquelles l'image du diaphragme cessera de paraître double, et il sera facile de constater que ce phénomène a lieu quand la section principale du prisme est parallèle et perpendiculaire au plan de la réflexion qui s'opère sur le réflecteur cc' .

Pour définir ces positions avec plus d'exactitude, l'extrémité ss' du tube est divisée sur sa circonférence en 360° , et chacun des anneaux qui s'adapte au tube, et qui s'arrête contre cette extrémité, porte un repère au moyen duquel on peut compter les angles.

La seconde propriété du faisceau polarisé se démontre aussi facilement que la première : on enlève l'anneau de la figure 736, et on y substitue celui de la figure 737. Alors on donne au réflecteur r' , qu'il porte une inclinaison telle que le faisceau réfléchi le rencontre en faisant avec sa surface un angle de $35^{\circ} 25'$, et l'on place l'œil dans une position convenable pour voir l'image du diaphragme oa' réfléchi sur r' ; ensuite on fait lentement tourner l'anneau s sans changer l'inclinaison de la glace, et l'on arrive bientôt à une position dans laquelle l'image réfléchie est complètement éteinte; en lisant la division correspondante au repère, il est facile de constater que le plan de réflexion sur la seconde glace est perpendiculaire au plan de réflexion sur la première.

Enfin, pour démontrer la troisième propriété, c'est la plaque de tourmaline (Fig. 738) qu'il faut adapter à l'extrémité du tube rr' (Fig. 735). On observe encore l'image du diaphragme oa' , et en faisant tourner l'anneau dans un sens ou dans l'autre, on voit cette image s'affaiblir graduellement pour disparaître tout-à-fait; à cet instant l'axe de la tourmaline est parallèle au plan de réflexion sur le premier réflecteur $o'o'$.

Les phénomènes qui se développent par réflexion sur le verre, se développent aussi suivant certaines lois sur toutes les surfaces réfléchissantes, comme nous le verrons plus loin.

Telles sont les propriétés caractéristiques des rayons polarisés : l'une quelconque de ces trois propriétés entraîne essentiellement les deux autres. Ainsi, pour reconnaître si un rayon est polarisé, nous pourrions nous contenter désormais de l'observer avec la plaque de tourmaline, ou avec le prisme bi-réfringent.

On est convenu d'appeler *plan de polarisation* le plan suivant lequel a été réfléchi la lumière qui se trouve polarisée par réflexion; mais comme on pourrait avoir à étudier un rayon polarisé dont on ne connaîtrait pas l'origine, il a été nécessaire, tout en conservant cette définition, d'en faire une autre équivalente, ou plutôt d'indiquer un autre caractère pour reconnaître le plan de polarisation; et la plaque de tourmaline est très commode pour cet usage : quand un rayon s'éteint en traversant la tourmaline, son plan de polarisation est parallèle à l'axe de la plaque; quand, au contraire, un rayon a son maximum d'intensité en traversant la tourmaline, son plan de polarisation est perpendiculaire à l'axe de la plaque.

Les expériences que nous venons de faire avec la lumière des nuées peuvent être faites avec une lumière quelconque artificielle ou naturelle : il est même possible alors de rendre les phénomènes sensibles à plusieurs observateurs à la fois. Pour cela on adapte au tube rr' de la figure 735 une tige à eburnière portant un verre dépoli qui peut être dirigé convenablement pour recevoir les images transmises, soit par le prisme, soit par la seconde

glace, soit par la plaque de tourmaline; seulement, quand les images ont un très vif éclat, elles ne disparaissent jamais d'une manière aussi complète.

La découverte de la polarisation, dont nous venons de donner une première idée, a été faite par Malus en 1810; jusque là personne n'avait soupçonné que la réflexion pût imprimer à la lumière des caractères particuliers. S'il suffisait d'une prodigieuse sagacité pour découvrir et analyser des propriétés si nouvelles et si extraordinaires, il fallait certainement un génie bien pénétrant pour développer ces propriétés, comme le fit Malus, et pour montrer aux physiciens qu'elles ouvraient en optique une carrière immense par son étendue et par sa richesse.

A l'époque de cette découverte, le système de l'émission était complètement dominant; on ne voyait en optique que des molécules lumineuses douées de divers accès et de diverses propriétés; toutes ces molécules éprouvant simultanément les mêmes effets lorsqu'elles avaient été réfléchies sur le verre sous un certain angle, on supposait qu'elles étaient toutes *tournees* de la même manière, et qu'en conséquence elles avaient des axes de rotation et des *pôles* autour desquels leurs mouvements pouvaient s'accomplir sous certaines influences. De là, le mot de *polarisation*, qui indiquait que les pôles étaient dirigés ou arrangés de la même manière pour toutes les molécules.

609. *Polarisation par simple réfraction.* — La lumière naturelle se polarise en traversant sous certaines conditions une série de plaques de verre à faces parallèles, et son plan de polarisation est alors perpendiculaire au plan d'émergence. Pour le démontrer on dispose parallèlement entre elles quatre ou cinq plaques de glace (Fig. 739); c'est ce qu'on appelle une *pile de plaques*; et on les ajuste à l'extrémité d'un tube en cuivre semblable à celui de la figure 735: la pile de plaques remplacée alors le réflecteur $o'o'$; et si l'on soumet à l'épreuve le pinceau transmis par cet appareil, en l'observant par l'un des trois moyens indiqués précédemment, il est facile de reconnaître qu'il est polarisé quand il pénètre dans les glaces en faisant avec leurs surfaces un angle de $35^{\circ} 25'$; et comme il a son maximum d'intensité quand l'axe de la tourmaline est parallèle au plan d'émergence, on en conclut que le plan de polarisation est perpendiculaire à ce plan. Si la lumière est très vive, elle n'est pas complètement polarisée, et il faut alors employer dans la pile un plus grand nombre de glaces.

Les autres corps transparents et non cristallisés présentent des phénomènes analogues; seulement, pour obtenir le maximum de polarisation, il faut que l'incidence varie avec la nature de la substance.

610. *Polarisation par double réfraction.* — Les deux faisceaux ordinaire et extraordinaire que donne la lumière naturelle en traversant la section

principale d'un cristal sont l'un et l'autre polarisés, le premier dans le plan d'émergence, et le second perpendiculairement à ce plan.

On en peut faire l'expérience en prenant un rhomboïde de spath d'Islande ou un prisme bi-réfringent que l'on ajuste à l'extrémité d'un tube semblable à celui de la figure 735. *xs'* (Fig. 740) représente le rhomboïde, et *so'* un diaphragme percé d'une très petite ouverture. En regardant à l'œil au par l'autre extrémité du tube, on voit deux images de l'ouverture du diaphragme, mais en regardant au travers de la plaque de tourmaline successivement chacune de ces images, on reconnaît facilement que l'image ordinaire (celle qui est dans l'axe et non déviée) acquiert son maximum d'intensité quand l'axe de la tourmaline est perpendiculaire à la section principale du rhomboïde, et qu'elle s'éteint, au contraire, quand l'axe de la tourmaline est dans la section principale elle-même : l'image extraordinaire (celle qui est hors de l'axe et déviée)

présente des phénomènes exactement inverses.

Cette épreuve devient un moyen sûr et commode de distinguer entre elles l'image ordinaire et l'image extraordinaire.

611. Polarisation par réflexion irrégulière. —

Lorsqu'une surface quelconque est éclairée par une vive lumière, les rayons irrégulièrement réfléchis qu'elle renvoie dans tous les sens se trouvent partiellement polarisés dans un plan perpendiculaire au plan d'émergence. Pour s'en assurer, il suffit de faire tomber dans la chambre noire un trait de lumière solaire sur une surface plus ou moins polie, et de regarder cette surface avec une plaque de tourmaline que l'on fait tourner dans son plan pour rendre l'axe tantôt parallèle, tantôt perpendiculaire au plan d'émergence des rayons ; dans le premier cas l'éclat de la surface sera très sensiblement plus vif que dans le second, ce qui prouve que la lumière est polarisée, comme nous l'avons dit, mais qu'elle n'est polarisée qu'en partie.

CHAPITRE III.

LOIS GÉNÉRALES DE LA POLARISATION.

612. *De l'angle de polarisation.* — Nous avons annoncé précédemment que le verre polarise complètement la lumière, par réflexion, sous un angle d'environ 35° avec la surface, ou de 55° avec la normale ; c'est cet angle que l'on nomme l'angle de polarisation. Il y a des surfaces réfléchissantes qui polarisent complètement la lumière sans aucune incidence : les surfaces du diamant sont dans ce cas ; l'angle de polarisation est alors celui qui donne la plus grande proportion de lumière polarisée. Entre tous les procédés qui ont été employés pour déterminer l'angle de polarisation de chaque substance, nous indiquerons seulement le procédé suivant, qui est celui de M. Arago.

Vers le milieu d'une chambre assez vaste, on choisit, à une hauteur convenable, un point où l'on établit horizontalement un cercle répéteur ou un autre instrument propre à mesurer les angles. A partir d'un point donné qui sert de 0, on trace sur les parois des divisions correspondantes aux divers degrés du cercle et à leurs fractions. Cela fait, on enlève le cercle répéteur, et au point précis, qui était occupé par son centre, on ajuste un petit support, destiné à recevoir les diverses substances que l'on veut soumettre à l'expérience. Nous supposons, par exemple, que l'on opère sur une topaze. Une bougie allumée est placée tout auprès de l'une

des divisions de la paroi, par exemple, auprès de la division zéro, et l'on observe la flamme par réflexion sur la surface de la topaze. La première condition à remplir est de rendre cette surface verticale ; pour cela on la déplace légèrement sur la circonférence qui la porte, jusqu'à ce que l'image réfléchie soit exactement à la même hauteur que la flamme. Alors, on fait tourner le support lui-même autour de son axe vertical ; on suit de l'œil l'image réfléchie, en la regardant avec une plaque de tourmaline ou avec un prisme bi-réfringent, et il est facile de reconnaître la position de la polarisation complète ou de la polarisation maximum. On s'arrête en ce point ; on regarde la division de la paroi qui se trouve sur le prolongement du rayon réfléchi, et la demi-distance angulaire comprise entre cette division et celle de la bougie donne l'angle du rayon incident avec la surface ; le complément de cet angle est l'angle de polarisation compté de la normale.

Voici quelques résultats obtenus par ce procédé ou par d'autres analogues. A côté de la colonne qui contient les angles observés se trouve une colonne contenant des angles calculés. Nous indiquerons dans un instant la formule qui a servi à faire ces calculs et la loi remarquable sur laquelle elle repose.

Nom des substances.	Angles de polarisation complète ou maximum.		Différences.
	Observé.	Calculé.	
Air.	45°	45° 0' 32"	
Eau.	62 45'	63 11	— 0° 26'
Spath fluor.	64 50	65 9	— 0 19
Obsidienne.	56 3	56 6	— 0 3
Sulfate de chaux.	56 28	56 45	— 0 17
Cristal de roche.	67 22	58 58	+ 0 24
Verre opale.	58 1	58 33	— 0 32
Topase.	58 40	58 34	+ 0 6
Perle.	58 47	58 50	— 0 3
Spath d'Islande.	58 23	58 51	— 0 28
Verre orangé.	59 12	59 23	— 0 16
Rubis spinelle.	60 16	60 25	— 0 9
Zircon.	63 8	63 0	+ 0 8
Verre d'antimoine.	64 45	64 30	+ 0 15
Soufre natif.	64 10	63 45	+ 0 25
Diamant.	68 2	68 1	+ 0 1
Chromate de plomb.	67 42	68 3	— 0 21

613. *Loi de M. Brewster sur l'angle de polarisation.* — En comparant les résultats d'un grand nombre d'observations, M. Brewster a découvert une loi d'une admirable simplicité qui lie les indices de réfraction des différentes substances aux angles de polarisation complète ou de polarisation maximum. Cette loi est la suivante :

La tangente de l'angle de polarisation est égale à l'indice de réfraction.

Elle peut être exprimée par la formule

$$\text{Tang. } r = n;$$

r désignant l'angle de polarisation,
 n l'indice de réfraction.

C'est au moyen de cette formule que l'on a calculé les angles rapportés dans le tableau précédent, et l'on peut être frappé de l'accord remarquable qui existe entre le calcul et l'observation. La vérité de cette loi se trouve encore prouvée indirectement par un grand nombre d'autres formules auxquelles elle sert de base.

Il suffit donc de connaître l'indice de réfraction d'une substance pour calculer son angle de polarisation; et, réciproquement, l'angle de polarisation étant connu pour un corps quelconque, il est facile d'en déduire l'indice de réfraction de ce corps.

Les substances doublement réfringentes ayant des indices de réfraction qui varient avec la grandeur des angles et la direction des plans d'incidences, il est présumable que les angles de polarisation doivent présenter alors quelques phénomènes particuliers, mais je ne connais jusqu'à présent aucune observation précise à cet égard.

Les indices de réfraction prenant des valeurs différentes pour les différentes couleurs, il en résulte que tous les rayons du spectre ne se polarisent pas sous le même angle. C'est ce que l'on peut en effet constater par l'expérience, en disposant

pour recevoir le faisceau polarisé une seconde glace qui doit l'absorber ou le transmettre complètement; il sera facile de voir dans la chambre noire qu'il y a toujours une faible lumière réfléchie par cette seconde glace, et qu'elle paraît colorée tantôt en rouge, tantôt en bleu, suivant que les angles d'incidence sont adaptés pour polariser la lumière bleue ou la lumière rouge.

La loi précédente peut recevoir encore une autre forme: on peut dire que l'angle de polarisation est celui pour lequel le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté. En effet,

r désignant toujours l'angle de polarisation complète,

n l'angle de réfraction correspondant,

n l'indice de réfraction,

Nous avons les deux équations :

$$\text{Tang. } r = n; \text{ et } \text{Sin. } r = n \text{ Sin. } a.$$

La première donne : $\text{Sin. } r = n \text{ Cos. } r$.

$$\text{Donc } \text{Cos. } r = \text{Sin. } a.$$

Ainsi les angles r et a sont complément l'un de l'autre, c'est-à-dire que l'on a

$$r + a = 90^\circ.$$

Or, $r + a$ étant le supplément de l'angle que le rayon réfléchi fait avec le rayon réfracté, il en résulte enfin que cet angle est aussi un angle droit.

La lumière n'est pas seulement polarisée à la première surface des corps; elle se polarise encore dans l'intérieur de leur masse, par la réflexion qu'elle éprouve à leur seconde surface: et cet angle de polarisation se trouve déterminé par la même loi;

seulement l'indice de réfraction étant alors $\frac{1}{n}$, c'est à $\frac{1}{n}$ que doit être égale la tangente de l'angle de polarisation.

Concevons, d'après cela, une plaque à faces parallèles, sur laquelle tombe un faisceau avec l'incidence r de la polarisation; la portion transmise jusqu'à la seconde surface viendra s'y réfléchir sous un angle a , et l'on aura les deux équations :

$$\text{Sin. } r = n \text{ Sin. } a; \text{ et } \text{Sin. } r = \text{Cos. } a.$$

La première est la loi de Descartes, et la seconde exprime que le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté.

Il en résulte évidemment :

$$\text{Tang. } a = \frac{1}{n}.$$

Aussi le faisceau qui se polarise à la première surface d'une lame à faces parallèles donne un faisceau réfracté qui va se réfléchir à la seconde surface, en se polarisant complètement.

614. *Loi de Malus sur le partage de la lumière polarisée.* — Nous avons vu (§603) que l'un des

ractions osentieles d'un faisceau polarisé est de n'éprouver aucune réflexion, lorsqu'il tombe sur une surface réfléchissante, avec la double condition que le plan d'incidence soit perpendiculaire au plan de polarisation, et que l'angle d'incidence soit égal à l'angle de polarisation. Ainsi, en représentant par τ l'intensité de la lumière réfléchie, on a dans ce cas :

$$\tau = 0.$$

Mais l'angle d'incidence restant le même, si l'on tourne la surface réfléchissante de manière que le plan d'incidence se rapproche graduellement du plan de polarisation, l'intensité de la lumière réfléchie va sans cesse en augmentant; et elle atteint son maximum quand ces deux plans sont amenés en coïncidence, de manière que leur angle soit réduit à 0° . En représentant ce maximum par μ , on a pour cette position limite :

$$\tau = \mu.$$

Dans l'impossibilité de déterminer par l'expérience la loi de ces accroissements d'intensité, Malus avait essayé de les représenter par la formule suivante :

$$\tau = \mu \cos.^\circ \lambda.$$

τ est l'intensité du faisceau réfléchi;

μ l'intensité maximum, ou celle qui a lieu quand le plan d'incidence coïncide avec le plan de polarisation ;

λ l'angle variable que le plan d'incidence fait avec le plan de polarisation. Cet angle est toujours compris entre 0° et 90° .

Cette formule semblait d'abord purement hypothétique; mais l'exactitude en est maintenant bien démontrée, soit par les expériences directes de M. Arago, soit par d'autres formules bien vérifiées dont elle est le principe fondamental, comme nous le verrons plus loin.

Pour $\lambda = 0^\circ$, on retrouve : $\tau = \mu$.

$$\text{Pour } \lambda = 45^\circ, \text{ on a : } \tau = \frac{\mu}{2}.$$

Pour $\lambda = 90^\circ$, on retrouve : $\tau = 0^\circ$.

Cette loi de Malus conduit à une conséquence remarquable et qui nous sera d'un grand secours pour la suite : c'est qu'un faisceau de lumière naturelle peut être considéré comme composé de deux faisceaux d'égale intensité, et polarisés à angle droit, l'un ayant par conséquent son plan de polarisation à droite du plan d'incidence, et l'autre à gauche. En effet, le plan de polarisation du premier de ces faisceaux faisant un angle λ avec le plan d'incidence, le plan de polarisation de l'autre fera un angle $90^\circ - \lambda$.

L'intensité de la lumière réfléchie dans le premier sera :

$$\mu \cos.^\circ \lambda.$$

L'intensité de la lumière réfléchie dans le second sera :

$$\mu \cos.^\circ (90^\circ - \lambda), \text{ ou } \mu \sin.^\circ \lambda.$$

La somme de ces deux intensités sera par conséquent :

$$\mu (\cos.^\circ \lambda + \sin.^\circ \lambda); \text{ ou } \mu,$$

c'est-à-dire qu'elle restera la même, et sera toujours indépendante de λ ou des diverses directions du plan d'incidence par rapport au rayon; en qui est en effet le caractère de la lumière naturelle ou non polarisée.

Lorsqu'un faisceau de lumière polarisée se présente pour traverser une plaque de tourmaline, nous savons que, dans une certaine position de la plaque (608), le faisceau est complètement absorbé, et l'intensité de la lumière transmise est égale à 0° ; tandis que, dans la position perpendiculaire, la plus grande partie du faisceau est transmise et l'intensité est maximum. Ces accroissements d'intensité sont encore représentés par la même formule.

$$\tau = \mu \cos.^\circ \lambda.$$

Enfin nous avons vu (608) qu'un rayon polarisé qui traverse un prisme bi-réfringent donne naissance à deux faisceaux, l'un ordinaire et l'autre extraordinaire; et que l'intensité relative de ces faisceaux dépend toujours de l'angle λ , que la section principale du prisme fait avec le plan de polarisation. Lorsque $\lambda = 45^\circ$, les deux faisceaux transmis sont égaux; lorsque $\lambda = 0^\circ$, le rayon ordinaire est au maximum; et le rayon extraordinaire nul; c'est le contraire quand $\lambda = 90^\circ$. Les intensités relatives de ces faisceaux sont encore représentées conformément à la loi de Malus, savoir :

Le faisceau ordinaire par $\tau = \mu \cos.^\circ \lambda$,

Et le faisceau extraordinaire par $\tau = \mu \sin.^\circ \lambda$.

μ est alors l'intensité du faisceau incident: car on admet qu'il passe en totalité et que le cristal n'en absorbe aucune partie.

Cette loi nous conduit encore à considérer un faisceau naturel d'une intensité μ comme composé de deux faisceaux polarisés à angle droit, ayant

l'un et l'autre une intensité $\frac{\mu}{2}$. Car, si l'on repré-

sente par λ l'angle du plan de polarisation du premier avec la section principale du prisme bi-réfringent, l'angle du second sera $90^\circ - \lambda$; et le premier donnera dans le prisme bi-réfringent :

un faisceau ordinaire $\frac{\mu}{2} \cos.^\circ \lambda$,

un faisceau extraordinaire $\frac{\mu}{2} \sin.^\circ \lambda$;

tandis que le second donnera un faisceau ordinaire

$$\frac{\mu}{2} \cos.^\circ (90^\circ - \lambda) = \frac{\mu}{2} \sin.^\circ \lambda,$$

un faisceau extraordinaire

$$\frac{n}{2} \sin. a \cdot (90^\circ - \lambda) = \frac{n}{2} \cos. a \cdot \lambda.$$

Ainsi la somme des deux faisceaux ordinaires sera

$$\frac{n}{2} (\cos. a + \sin. a \cdot \lambda), \text{ ou } \frac{n}{2};$$

et celle des deux faisceaux extraordinaires

$$\frac{n}{2} (\sin. a + \cos. a \cdot \lambda) = \frac{n}{2};$$

c'est-à-dire que les deux images seront toujours égales en intensité, quelle que soit la position principale par rapport aux plans de polarisation, pourvu qu'ils soient perpendiculaires entre eux; ce qui est le caractère de la lumière naturelle.

615. *Loi de Fresnel sur l'intensité de la lumière réfléchie.*

La quantité de lumière réfléchie par les surfaces polies augmente sans cesse avec l'obliquité de l'incidence; c'est un fait que l'on peut constater aisément par des expériences approximatives; mais l'on n'avait encore, il y a dix ans, ni une méthode expérimentale pour comparer rigoureusement les intensités correspondantes aux diverses obliquités, ni une formule générale pour exprimer dans tous les cas le rapport qui existe entre la lumière incidente et la lumière réfléchie. Les phénomènes de la polarisation ont conduit à cette double solution du problème. M. Arago a imaginé la première, et Fresnel la seconde (1). La formule de Fresnel repose sur des considérations mécaniques que nous ne pouvons développer ici, nous nous bornerons seulement à la discuter pour quelques cas particuliers. Ceux qui voudront de plus amples détails pourront consulter les mémoires originaux (*Ann. de Phys. et de Chim.*, t. XVII, pag. 191 et 312). Cette formule est la suivante :

$$r = \frac{\sin. a \cdot (i - r')}{\sin. a \cdot (i + r')} \cdot \cos. a + \frac{\text{Tang.} a \cdot (i - r')}{\text{Tang.} a \cdot (i + r')} \cdot \sin. a \cdot \lambda.$$

L'intensité de la lumière incidente est prise pour unité.

r est l'intensité de la lumière réfléchie;

i l'angle d'incidence;

r' l'angle de réfraction correspondant;

λ l'angle que le plan de polarisation de la lumière incidente fait avec le plan d'incidence ou de réflexion.

1°. Si la lumière incidente est complètement polarisée dans le plan d'incidence, on a :

$$a = 0^\circ, \sin. a = 0, \cos. a = 1;$$

(1) Le procédé remarquable découvert par M. Arago pour comparer les intensités de lumière, n'ayant pas été publié, nous avons à regretter de ne pouvoir l'exposer ici.

et par conséquent :

$$r = \frac{\sin. a \cdot (i - r')}{\sin. a \cdot (i + r')}$$

Telle est la formule simple qui s'applique à la lumière polarisée dans le plan d'incidence; pour en faire usage il suffit de connaître l'angle i pour lequel on veut déterminer l'intensité de la lumière réfléchie, et de connaître encore l'indice de réfraction n de la substance sur laquelle la réflexion s'accomplit; alors r' sera déterminé par la formule

$$\sin. i = n \sin. r'.$$

Et il restera seulement à substituer pour i et r' leurs valeurs, puis en achevant le calcul on aura la valeur de r ou la proportion de lumière réfléchie;

2°. Si la lumière est complètement polarisée dans le plan perpendiculaire au plan d'incidence, et si, en même temps, l'angle d'incidence est celui de la polarisation complète, on a :

$$a = 90^\circ, \cos. a = 0, \sin. a = 1, \\ i + r' = 90^\circ, \sin. (i + r') = 1, \text{Tang.} (i + r') = \infty,$$

et par conséquent :

$$r = 0.$$

Nous savons qu'en effet dans ces circonstances la réflexion est exactement nulle (608).

Mais les circonstances étant les mêmes si l'angle d'incidence n'est pas celui de la polarisation complète, on n'a plus $i + r' = 90^\circ$, et l'on trouve par conséquent

$$r = \frac{\text{Tang.} a \cdot (i - r')}{\text{Tang.} a \cdot (i + r')}$$

La valeur numérique de r sera donnée comme dans le cas précédent.

3°. Si la lumière incidente est complètement polarisée dans un plan faisant un angle de 45° avec le plan d'incidence, on a

$$a = 45^\circ, \cos. a = \frac{1}{2}, \sin. a = \frac{1}{2},$$

Et par conséquent

$$r = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin. a \cdot (i - r')}{\sin. a \cdot (i + r')} + \frac{\text{Tang.} a \cdot (i - r')}{\text{Tang.} a \cdot (i + r')} \right\}.$$

Ce résultat est exactement celui qu'on obtiendrait en considérant deux faisceaux incidents d'égale intensité, $1/2$ étant leur intensité commune; l'un étant polarisé dans le plan d'incidence, et l'autre perpendiculairement à ce plan; car le premier donnerait :

$$\frac{1}{2} \frac{\sin. a \cdot (i - r')}{\sin. a \cdot (i + r')}$$

et le second :

$$\frac{1}{2} \frac{\text{Tang.} a \cdot (i - r')}{\text{Tang.} a \cdot (i + r')}.$$

Or en tombant ensemble sous la même incidence,

ils se réfléchiraient ensemble sous le même angle, et l'intensité du faisceau réfléchi serait égale à la somme des intensités de chacun, ou à

$$\frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(i-f)}{\sin^2(i+f)} + \frac{\tan^2(i-f)}{\tan^2(i+f)} \right\}.$$

4°. Si la lumière incidente est *mélangée* ou composée d'une quantité x de lumière polarisée et par conséquent d'une quantité $1-x$ de lumière naturelle, i étant toujours l'angle que le plan de polarisation de la partie polarisée fait avec le plan d'incidence, on peut encore aisément trouver la proportion de lumière réfléchi; car la portion x de lumière polarisée donne à la réflexion une quantité de lumière représentée par

$$x \cdot \left\{ \frac{\sin^2(i-f)}{\sin^2(i+f)} \cos^2 A + \frac{\tan^2(i-f)}{\tan^2(i+f)} \sin^2 A \right\};$$

et la portion $1-x$, qui n'est pas polarisée peut être considérée comme composée d'une partie $1-x$ polarisée dans le plan d'incidence, et d'une

partie égale $\frac{1-x}{2}$ polarisée dans le plan perpendiculaire au plan d'incidence.

La première donne à la réflexion :

$$\frac{1-x}{2} \frac{\sin^2(i-f)}{\sin^2(i+f)}$$

La deuxième donne

$$\frac{1-x}{2} \frac{\tan^2(i-f)}{\tan^2(i+f)}$$

Et la somme de ces trois faisceaux réfléchis forme la véritable valeur de τ , qui est alors :

$$\tau = \frac{1+x \cos^2 A \sin^2(i-f)}{2 \sin^2(i+f)} + \frac{1-x \cos^2 A \tan^2(i-f)}{2 \tan^2(i+f)}.$$

Lorsque $x=1$, cette formule reproduit celle que nous venons de donner pour la lumière complètement polarisée, et lorsque $x=0$, elle reproduit celle que nous avons trouvée pour la lumière polarisée à 45° en pour la lumière naturelle.

Mais un faisceau de lumière naturelle d'une intensité égale à 1 peut toujours, comme nous l'avons dit (§14), être considéré comme composé de deux faisceaux ayant chacun une intensité $1/2$ et polarisés à angle droit. La valeur précédente de τ est donc celle qui convient à la lumière naturelle; et l'on voit comment, au moyen de l'indice de réfraction d'une substance, on peut calculer aisément la proportion de lumière qu'elle réfléchit sous une éblouité quelconque.

5°. Si la lumière tombe sous l'incidence perpendiculaire, on a

$$i = 0^\circ, f = 0^\circ;$$

et l'expression de τ devient alors 0/0. Mais il est facile d'en trouver la véritable valeur; car n'étant

l'indice de réfraction, il est évident que pour de très petits angles on peut substituer les angles eux-mêmes aux sinus et aux tangentes, et réciproquement, alors la loi de Descartes,

$$\sin i = n \sin f, \text{ se change en } i = n f.$$

Il en résulte d'une part

$$i - f = f(n-1) \\ i + f = f(n+1),$$

et de l'autre

$$\frac{\sin^2(i-f)}{\sin^2(i+f)} = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \\ \frac{\tan^2(i-f)}{\tan^2(i+f)} = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

et par conséquent

$$\tau = (\cos^2 A + \sin^2 A) \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

Ce qui prouve, comme on pouvait s'y attendre, que sous l'incidence perpendiculaire, la lumière se réfléchit toujours en même proportion, soit qu'elle se trouve à l'état naturel et sans être polarisée, soit qu'elle se trouve polarisée dans un plan quelconque.

618. *Mouvement du plan de polarisation, par l'effet de la réflexion.*

Lorsqu'un rayon de lumière polarisée se réfléchit sur une surface polie sous diverses éblouités, la portion réfléchi se trouve encore polarisée; mais il arrive, en général, que son plan de polarisation a changé de direction. Si l'en suppose, par exemple, que le plan de polarisation de la lumière incidente fasse un angle de 45° avec le plan de réflexion, on pourra trouver que le plan de polarisation de la lumière réfléchi ne fait plus, avec ce même plan de réflexion, qu'un angle de 40, 30, 20 ou 10°, ou même un angle tout-à-fait nul; cela dépendra de l'incidence. C'est ce changement de direction que l'on appelle le *mouvement du plan de polarisation*. On dit que ce plan tourne de 10, 20 ou 30°, quand l'angle qu'il faisait avec le plan d'incidence diminue ou augmente de 10, 20 ou 30°. L'angle du plan de polarisation avec le plan d'incidence en de réflexion se nomme aussi l'*azimut* du plan de polarisation.

C'est encore Fresnel qui a donné le premier une formule pour exprimer ce mouvement du plan de polarisation. Elle était d'abord restreinte au cas où l'azimut est de 45°, mais on l'a ensuite généralisée, et alors elle a pris la forme suivante :

$$\text{Tang. } A' = \text{Tang. } A \cdot \frac{\cos(i+f)}{\cos(i-f)}$$

A est l'azimut du plan de polarisation dans le rayon incident;

A' l'azimut du plan de polarisation dans le rayon réfléchi;

i est l'angle d'incidence sous lequel s'accomplit la réflexion;

i' l'angle de réfraction correspondant à l'angle d'incidence.

Il se détermine par la relation $\text{Sin. } i = n \text{ Sin. } i'$; n étant l'indice de réfraction de la substance réfléchissante.

1°. Pour que l'on puisse avoir $\lambda = \lambda'$, il faut que l'on ait . . . $\text{Cos. } (i + i') = \text{Cos. } (i - i')$; condition qui ne peut en réalité être remplie que de deux manières :

par . . . $i = 0^\circ$ qui donne $i' = 0^\circ$;

et par . . . $i = 90^\circ$, qui donne $\text{Sin. } i' = \frac{1}{n}$.

D'où il suit que la réflexion perpendiculaire et la réflexion sous le plus grand angle possible sont les seules qui ne fassent pas changer l'azimut du plan de polarisation, quelle que soit sa valeur.

2°. Les angles i et i' étant toujours plus petits que 90° , il en résulte que $\text{Cos. } (i + i')$ est toujours plus petit que $\text{Cos. } (i - i')$, et par conséquent $\text{Tang. } \lambda'$ toujours plus petit que $\text{Tang. } \lambda$, ou λ' toujours plus petit que λ ; c'est-à-dire que, dans son mouvement, le plan de polarisation se rapproche toujours du plan d'incidence.

3°. Lorsque l'on a

$$i + i' = 90^\circ,$$

ou, ce qui revient au même, quand le rayon tombe sous l'incidence de la polarisation complète (613), on a toujours :

$$\text{Cos. } (i + i') = 0 \text{ et } \text{Tang. } \lambda' = 0, \lambda' = 0.$$

Ainsi, sous l'angle de la polarisation complète, le rayon réfléchi se trouve toujours polarisé dans le plan d'incidence, quel que soit l'azimut du plan de polarisation du rayon incident.

Ce résultat fait comprendre comment le fait de la polarisation totale se trouve lié au mouvement du plan de polarisation par la réflexion, et combien il est conforme aux analogies de considérer un faisceau de lumière naturelle comme un faisceau composé d'une foule de rayons polarisés dans tous les azimuts, puisque la réflexion ramène dans le plan d'incidence les plans de polarisation de tous ces rayons.

4°. Lorsque l'azimut du plan de polarisation est de 45° , on a $\text{Tang. } \lambda = 1$; et

$$\text{Tang. } \lambda' = \frac{\text{Cos. } (i + i')}{\text{Cos. } (i - i')}$$

Cette formule a été vérifiée par Fresnel, sur des angles qu'il avait observés directement avant d'avoir découvert la loi générale qui enchaîne tous les mouvements du plan de polarisation.

Voici le tableau de ces comparaisons, tel qu'il a été publié (*Ann. de Phys. et de Chim.*, t. XVII, pag. 314) :

Incidences.	Azimut du plan de polarisation après la réflexion.		Différences.
	Calculé	Observé	

Sur le verre.

24.	+37° 54'	+38° 55'	—1° 1'
39.	+24 38	+24 35.	+0 3
49.	+10 52	+11 45.	—0 53
60.	— 5 29	— 5 15.	—0 14
70.	—20 24	—19 52.	—0 32
80.	—33 25	—32 45.	—0 40
85.	—39 19	—38 55.	—0 24
87.	—41 36	—40 55.	—0 41
88.	—42 44	—41 15.	—1 29
89.	—43 52	—44 35.	+0 43

Sur l'eau.

60.	—10 51	—10 20.	—0 31
70.	—24 48	—25 20.	+0 32
80.	—35 49	—36 20.	+0 21
85.	—40 32	—40 50.	+0 18

M. Brewster, dans un mémoire tout récent (*Trans. Phil.*, 1830), vient d'en donner deux autres vérifications, qui s'étendent à des incidences plus variées.

Sur le verre.

Incidences.	Azimut du plan de polarisation après la réflexion.	Azimut du plan de polarisation après la réflexion.		Différences.
		Calculé.	Observé.	
10.	0° 44.	43 49	44 0.	+0 11
20.	13 20.	40 4	39 0.	—1 4
30.	19 43.	33 19	32 25.	—0 54
40.	25 42.	23 1	22 37.	—0 24
45.	28 29.	16 31	16 55.	+0 24
50.	31 22.	9 0	9 0.	0 0
56.	34 0.	0 0	0 0.	0 0
60.	35 45.	6 16	6 10.	—0 6
65.	37 41.	13 53	14 40.	+0 47
70.	39 20.	21 3	22 18.	+1 3
75.	40 40.	27 41	28 45.	+1 4
80.	41 37.	33 46	33 13.	—0 33
84.	42 8.	38 22	38 47.	+0 25
86.	42 17.	40 38	40 43.	+0 7
88.	42 23.	42 49	43 4.	+0 25
90.	0 0.	45 0	45 0.	0 0

Sur le diamant.

50.	18 18.	23 30	24 0.	+0 30
60.	20 47.	11 41	12 30.	+0 49
67 43.	22 17.	0 0	0 0.	0 0
70.	22 39.	3 54	4 30.	+0 36
75.	23 19.	13 8	14 30.	+1 22
80.	23 48.	23 12	24 0.	+0 48
85.	24 6.	33 56	34 30.	+0 34
90.	24 12.	45 5	45 0.	+0 0

Enfin M. Brewster a fait une série d'observations pour vérifier la formule générale; la réflexion avait lieu sur une lame de cristal de roche taillées parallèlement à l'axe. Pour une incidence

de 75° , avec un azimut du plan de polarisation égale à 45° dans le rayon incident, on avait un azimut de $26^\circ 20'$ dans le rayon réfléchi. Ainsi, pour ce cas particulier, la valeur de λ' était $26^\circ 20'$; ce qui donne

$$\text{Tang. } 26^\circ 20' = \frac{\text{Cos. } (i + \epsilon')}{\text{Cos. } (i - \epsilon')}$$

En conservant la même obliquité, i et ϵ' restent les mêmes; on peut donner à λ diverses valeurs, et calculer les valeurs correspondantes de λ' par la formule

$$\text{Tang. } \lambda' = \text{Tang. } \lambda \cdot \text{Tang. } 26^\circ 20'.$$

Voici le tableau des résultats du calcul et de l'expérience :

Valeurs de λ .	Valeurs de λ'		Différences.
	Observée.	Calculée.	
0. 0 0	0 0	0 0	+0 0
10. 4 54	4 29.	4 29.	+0 25
20. 10 0	10 16.	10 16.	-0 16
30. 15 50	16 2.	16 2.	-0 12
35. 20 0	19 12.	19 12.	+0 48
40. 23 30	22 40.	22 40.	+0 50
45. 26 20	26 27.	26 27.	-0 7
50. 30 0	30 40.	30 40.	-0 40
55. 35 30	35 23.	35 23.	+0 7
60. 40 0	40 45.	40 45.	-0 45
70. 53 0	53 49.	53 49.	-0 49
80. 70 0	70 29.	70 29.	-0 29
90. 90 0	90 0.	90 0.	-0 0

Les différences entre le calcul et l'observation sont tout-à-fait dans les limites des erreurs d'observation, et l'exactitude de la formule générale se trouve ainsi confirmée d'une manière satisfaisante.

Tous ces mouvements du plan de polarisation peuvent être représentés par une construction graphique qui a l'avantage de parler aux yeux. Prenons une ligne qr (Fig. 741) que nous diviserons en 90 parties égales; supposons que cette ligne représente la direction du plan d'incidence sur la surface réfléchissante, et que les faisceaux incidents tombent successivement en différents points sur cette ligne avec des obliquités marquées par le rang de ces points. Ainsi, au point r , où est écrit 0° , le faisceau tombera perpendiculairement; au point λ , il tombera avec une incidence de 20° ; avec une incidence de 40° au point a , de 55° au point c , de 70° au point v , et de 90° au point q . Supposons enfin que le plan de polarisation de tous ces faisceaux incidents ait un azimut de 45° ; alors la ligne os , dans ses diverses positions, représentera le plan de polarisation du faisceau réfléchi. On voit que c'est à l'incidence de 55° avec la normale, ou de 34° avec la surface, que le plan de polarisation du faisceau réfléchi devient parallèle au plan de réflexion, et que de part et d'autre de cette position, c'est-à-dire pour des obliquités moindres ou plus grandes,

le plan de polarisation change de côté : pour les obliquités moindres il est à droite du plan d'incidence, et il passe à gauche pour les obliquités plus grandes.

La figure 742 représente le mouvement du plan de polarisation pour un rayon polarisé ayant aussi un azimut de 45° , mais de l'autre côté du plan d'incidence.

Après avoir représenté graphiquement ce qui arrive aux rayons polarisés dans l'azimut de 45° , soit à droite, soit à gauche du plan de réflexion, il est facile d'en déduire ce qui arrivera à un faisceau de lumière naturelle. Car un tel faisceau, d'une intensité égale à 1, peut être regardé comme composé de deux faisceaux ayant chacun une intensité égale à $1/2$ et polarisés à angle droit (314); or, si nous supposons que l'un de ces faisceaux composés ait son plan de polarisation dans l'azimut de 45° et à droite du plan d'incidence, l'autre faisceau devra avoir aussi son plan de polarisation dans l'azimut de 45° , mais à gauche du plan d'incidence. Par conséquent les phénomènes de la lumière naturelle ne sont que la superposition des phénomènes représentés dans les figures 741 et 742; c'est ce qui est représenté dans la figure 743. Il en résulte que, sous l'incidence perpendiculaire, le faisceau réfléchi est sans polarisation, comme le faisceau incident, car il est, comme lui, composé de deux faisceaux d'égale intensité et polarisés à angle droit. A mesure que l'incidence augmente, les plans de polarisation se rapprochent graduellement; et quand la réflexion a lieu sur le verre, ils deviennent enfin parallèles entre eux et au plan de réflexion, pour l'incidence de 55° ; c'est-à-dire qu'alors le rayon réfléchi est complètement polarisé dans le plan de réflexion : au delà de cette limite, et pour toutes les incidences plus grandes, chacun des plans de polarisation continue à tourner dans le même sens, celui de droite passant à gauche du plan d'incidence, et celui de gauche passant à droite : et enfin, pour l'incidence de 90° , les deux plans de polarisation se retrouvent perpendiculaires entre eux, chacun ayant repris un azimut de 45° de l'autre côté du plan d'incidence. Ces résultats vont nous servir à expliquer la polarisation partielle et la polarisation complète, qui résulte de plusieurs réflexions successives.

617. *Polarisation partielle et polarisation complète produite par plusieurs réflexions successives.* — Quand un faisceau de lumière naturelle se réfléchit sous un angle plus grand ou plus petit que celui de la polarisation complète, il présente toutes les apparences d'un faisceau partiellement polarisé. Pour s'en assurer, il suffit de l'observer avec une plaque de tourmaline; car l'image ne disparaît en totalité pour aucune position de la plaque; mais elle change d'intensité à mesure que la plaque tourne dans son plan. Plusieurs physiciens regardaient cette lumière mélangée comme composée de deux faisceaux, l'un ayant conservé son état

naturel, et l'autre ayant été polarisé dans le plan d'incidence. Mais M. Brewster n'avait point partagé cette opinion; dès 1815 il en avait émis une autre, dont il me semble avoir démontré la justesse dans un travail remarquable qu'il vient de publier (*Transactions philosophiques*, 1830). M. Brewster assimile toujours un faisceau de lumière naturelle d'une intensité = 1 à un système de deux faisceaux d'une intensité 1/2, et polarisés chacun dans l'azimut de 45°, l'un à droite et l'autre à gauche du plan d'incidence. Il en conclut par conséquent qu'un faisceau naturel, qui se réfléchit sur du verre, sous un angle de 40° par exemple (Fig. 743), se trouve, après la réflexion, composé de deux faisceaux polarisés, l'un dans l'azimut de 23° 1' à droite du plan d'incidence, et l'autre dans l'azimut de 23° 1' à gauche du même plan. Ainsi, après la réflexion, il n'y a plus de lumière naturelle, suivant M. Brewster; tout est polarisé: mais tout ne semble pas l'être; car, si l'on vient analyser le faisceau réfléchi, soit avec la tourmaline, soit avec un prisme bi-réfringent, il est facile de voir qu'il paraîtra composé de deux parties, l'une naturelle, l'autre polarisée dans le plan d'incidence. C'est cette apparence qui avait trompé les observateurs. M. Brewster ne se contente pas de montrer que son opinion est une conséquence nécessaire du mouvement du plan de polarisation; il calcule encore la proportion de lumière qui doit, pour chaque incidence, paraître polarisée dans le plan de réflexion; et il détermine enfin tous les effets des réflexions successives pour polariser la lumière.

Voici la formule qui donne la proportion de lumière polarisée par la réflexion sous une incidence quelconque, soit pour un faisceau de lumière mélangée, soit pour un faisceau naturel.

Concevons un faisceau de lumière composé de deux autres faisceaux d'égale intensité, polarisés dans l'azimut α , l'un à droite du plan d'incidence, et l'autre à gauche du même plan.

Soit 1/2 l'intensité de chacun de ces faisceaux incidents, et par conséquent 1 l'intensité totale de la lumière incidente.

La portion totale τ de lumière réfléchie sera donnée par la formule

$$\tau = \frac{\sin^2(\alpha - \theta)}{\sin^2(\alpha + \theta)} \cos^2 \alpha + \frac{\tan^2 \alpha (\alpha - \theta)}{\tan^2 \alpha (\alpha + \theta)} \sin^2 \alpha.$$

Elle se compose de deux parties, égales à $\frac{\tau}{2}$, produites par chacun des faisceaux réfléchis.

Soit α' l'azimut du plan de polarisation après la réflexion, cet azimut sera à droite du plan d'incidence pour l'un des faisceaux, et à gauche pour l'autre; il sera donné par la formule

$$\tan \alpha' = \tan \alpha \cdot \frac{\cos(\alpha + \theta)}{\cos(\alpha - \theta)}$$

Maintenant, si l'un des faisceaux réfléchis, par

exemple, celui dont l'azimut est à droite, est reçu par un prisme bi-réfringent dont la section principale coïncide avec le plan d'incidence, il donnera deux images; l'une ordinaire, ayant une intensité

$$\frac{1}{2} \cos^2 \alpha';$$

l'autre extraordinaire, ayant une intensité

$$\frac{1}{2} \sin^2 \alpha'.$$

Le faisceau dont l'azimut est à gauche donnera pareillement pour son image ordinaire

$$\frac{1}{2} \cos^2 \alpha',$$

et pour son image extraordinaire

$$\frac{1}{2} \sin^2 \alpha'.$$

Ainsi l'image ordinaire totale sera

$$\tau \cos^2 \alpha',$$

et l'image extraordinaire

$$\tau \sin^2 \alpha'.$$

La portion de lumière κ , qui paraît polarisée dans le plan d'incidence ou dans la section principale du prisme, est évidemment donnée par la différence d'intensité qui existe entre la première et la seconde de ces images: aiosi

$$\kappa = \tau \cos^2 \alpha' - \tau \sin^2 \alpha' = \tau (1 - 2 \sin^2 \alpha').$$

Pour avoir la valeur de κ il reste seulement à mettre pour τ sa valeur précédente et pour $\sin \alpha'$ sa valeur tirée de l'équation en $\tan \alpha'$.

$$\kappa = \frac{\sin^2(\alpha - \theta)}{(\sin^2(\alpha + \theta))} \cos^2 \alpha + \frac{\tan^2 \alpha (\alpha - \theta)}{\tan^2 \alpha (\alpha + \theta)} \sin^2 \alpha \left\{ \frac{\cos^2(\alpha - \theta) - \tan^2 \alpha \cos^2(\alpha + \theta)}{\cos^2(\alpha - \theta) + \tan^2 \alpha \cos^2(\alpha + \theta)} \right\}$$

Telle est la proportion de lumière qui paraît polarisée dans le plan d'incidence, après une réflexion sous l'angle θ , lorsque le faisceau incident est composé de deux autres faisceaux polarisés dans l'azimut α , l'un à droite et l'autre à gauche du plan d'incidence.

Pour appliquer cette formule au cas où la lumière incidente est de la lumière naturelle, il suffit de supposer $\alpha = 45^\circ$; alors

$$\cos^2 \alpha = 1/2, \sin^2 \alpha = 1/2, \tan^2 \alpha = 1.$$

Et

$$\kappa = 1/2 \left\{ \frac{\sin^2(\alpha - \theta)}{\sin^2(\alpha + \theta)} + \frac{\tan^2 \alpha (\alpha - \theta)}{\tan^2 \alpha (\alpha + \theta)} \right\} \left\{ \frac{\cos^2(\alpha - \theta) - \cos^2(\alpha + \theta)}{\cos^2(\alpha - \theta) + \cos^2(\alpha + \theta)} \right\}$$

M. Brewster a calculé le tableau suivant des valeurs de κ , déduite de cette formule, pour toutes

les incidences, depuis 0° à 90° ; dans l'hypothèse que la réflexion a lieu sur du verre pour lequel l'indice de réfraction est égal à 1.625; $n = 1.625$; les intensités des faisceaux incidents et réfléchis ont été multipliés par 1000.

Angle d'incidence.	Angle de réflexion.	Angle du plan de polarisation.	Quantité de lumière réfléchie.	Quantité de lumière polarisée dans le plan de réflexion.	Rapport d'intensité entre la lumière polarisée et réfléchie.
i	i'	A'	T	K	$\frac{K}{T}$
0	0	0	43,23	0,00	0 00
10	5	32	43,51	43,30	1,74 0 04
20	12	58	40 13	43,41	7,22 0 17
25	16	5	37 21	43,04	11,60 0 26
30	19	8	33 40	44,78	17,25 0 38
35	22	6	29 8	46,33	24,37 0 57
40	24	56	23 41	49,10	33,25 0 68
45	27	37	17 22	53,06	44,09 0 82
50	30	9	10 18	61,36	57,36 0 94
55	46'	33 15	0	79,50	70,50 1 00
60	34	38	5 4	93,31	91,60 0 90
65	36	28	12 45	124,86	112,70 0 90
70	38	2	18 32	162,07	129,80 0 78
75	39	18	26 52	257,26	152,34 0 59
78	39	54	30 44	329,95	167,67 0 48
79	40	4	31 59	359,27	167,69 0 44
80	40	13	33 13	391,70	156,60 0 40
82	44	40	35 36 22	490,44	145,40 0 29
84	40	42	38 2	500,32	134,03 0 24
85	40	47	39 12	610,28	123,75 0 20
86	40	51	40 23	676,26	108,67 0 16
87	40	54	41 32	744,11	89,83 0 12
88	40	57	42 43	819,90	65,90 0 08
89	40	58	43 51	904,81	36,32 0 04
90	40	58	45 0	1000,00	0 0 00

Tous les nombres contenus dans ce tableau sont des résultats de calcul; les seuls qui aient été vérifiés par l'expérience sont ceux qui appartiennent aux incidences de 0° , 90° , et à l'incidence $56^\circ 43'$, pour laquelle la polarisation est complète.

Mais voici quelques résultats d'expériences, obtenus par M. Arago, qui peuvent servir à mettre la formule à l'épreuve.

En comparant les quantités de lumière polarisée, par réflexion, sous diverses incidences prises de part et d'autre de l'angle de polarisation complète, M. Arago a trouvé que ces quantités étaient égales pour les incidences suivantes :

Verre, n° 1.	$\begin{cases} 82^\circ. 48' \\ 24 18 \end{cases}$
n° 2.	$\begin{cases} 82 5 \\ 26 6 \end{cases}$
n° 3.	$\begin{cases} 78 30 \\ 29 42 \end{cases}$
Eau, n° 4.	$\begin{cases} 86 31 \\ 16 12 \end{cases}$

Or, en calculant, d'après la formule précédente, les quantités de lumière polarisée dans ces circonstances on trouve :

	Angle d'incid.	Angle du plan de polarisation.	Lumière polarisée.	Différences
	i	A'	K	
Verre n° 1.	$\begin{cases} 82^\circ 48' \\ 24 18' \end{cases}$	$\begin{cases} 37^\circ 33' \\ 37 21' \end{cases}$	$\begin{cases} 0,2573 \\ 0,2637 \end{cases}$	$\begin{cases} 1 \\ 0,0065 \text{ ou } \frac{1}{154} \end{cases}$
n° 2.	$\begin{cases} 82 5' \\ 26 6' \end{cases}$	$\begin{cases} 36^\circ 47' \\ 36 0 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,2828 \\ 0,3090 \end{cases}$	$\begin{cases} 1 \\ 0,0262 \text{ ou } \frac{1}{38} \end{cases}$
n° 3.	$\begin{cases} 78^\circ 20' \\ 29 42' \end{cases}$	$\begin{cases} 32^\circ 28' \\ 33 1' \end{cases}$	$\begin{cases} 0,4186 \\ 0,4064 \end{cases}$	$\begin{cases} 1 \\ 0,0122 \text{ ou } \frac{1}{82} \end{cases}$
Eau, n° 4.	$\begin{cases} 86^\circ 31' \\ 16 12' \end{cases}$	$\begin{cases} 41^\circ 54' \\ 41 27' \end{cases}$	$\begin{cases} 0,1080 \\ 0,1236 \end{cases}$	$\begin{cases} 1 \\ 0,0156 \text{ ou } \frac{1}{64} \end{cases}$

On voit que, dans chacune de ces quatre expériences, le calcul ne donne pas une égalité rigoureuse entre les quantités de lumière polarisée; mais les différences sont assez petites pour que l'on puisse regarder ces résultats comme une confirmation de l'exactitude de la formule.

La moyenne des deux angles sous lesquels la quantité de lumière polarisée est la même, reproduit presque exactement l'angle de polarisation totale; car cette moyenne est $53^\circ 33'$ pour la première expérience, $54^\circ 5'$ pour la seconde, $54^\circ 1'$ pour la troisième, et $51^\circ 22'$ pour la quatrième. M. Arago en avait conclu cette loi remarquable, que, pour des incidences également éloignées de l'angle de polarisation complète, les quantités de lumière polarisées par réflexions sont égales. Par exemple, une surface de verre, qui polarise complètement la lumière sous une incidence de 54° , polariserait des quantités égales sous les incidences de 53° et 55° , d'autres quantités égales sous les incidences de 51° et 59° , etc.

La formule de M. Brewster s'accorde assez bien avec cette loi expérimentale; cependant, si la réflexion avait lieu sur des corps très réfléchissants, et si les incidences s'écartaient beaucoup de l'angle de polarisation complète, l'on trouverait sans doute des différences sensibles entre les résultats du calcul et ceux de l'observation.

Nous pouvons maintenant étudier l'influence des réflexions successives pour polariser la lumière; c'est M. Brewster qui a fait le premier l'analyse de ces phénomènes, et nous y trouverons une confirmation bien frappante des formules qui précèdent.

Lorsqu'un faisceau de lumière naturelle a été réfléchi sur du verre, sous un angle de 60° par exemple, il peut être regardé comme composé de deux faisceaux d'égale intensité et polarisés dans l'azimut de $60^\circ 11'$, l'un à droite et l'autre à gauche du plan d'incidence (tableau précédent, page 457).

Tel est le changement physique qu'il a éprouvé. Ce même faisceau réfléchi, tombant, sous la même incidence, sur une autre surface de verre pour y subir une seconde réflexion dans un plan parallèle au premier plan d'incidence, éprouvera un nouveau degré de rapprochement entre les plans de polarisation de droite et de gauche, puis un nouveau degré encore par une troisième réflexion, etc., jusqu'à ce qu'enfin les deux plans de polarisation soient sensiblement coïncidés entre eux et avec le plan d'incidence : alors le faisceau paraîtra complètement polarisé dans ce plan.

Pour calculer ces effets, il suffit de suivre le mouvement des plans de polarisation dans les réflexions successives. Or, si nous représentons par A^1, A^2, A^3, A^4 les azimuts du plan de polarisation après la première, la seconde, la troisième, la quatrième réflexion, et si nous remarquons que l'azimut de la lumière incidente est de 45° , parce que cette lumière est dans son état naturel; nous aurons :

$$\text{Tang. } A^1 = \frac{\cos. (i + r)}{\cos. (i - r)}$$

$$\text{Tang. } A^2 = \text{Tang. } A^1 \cdot \frac{\cos. (i + r)}{\cos. (i - r)}$$

$$\text{Tang. } A^3 = \text{Tang. } A^2 \cdot \frac{\cos. (i + r)}{\cos. (i - r)}$$

$$\text{Tang. } A^{(n)} = \text{Tang. } A^{(n-1)} \cdot \frac{\cos. (i + r)}{\cos. (i - r)}$$

D'où il résulte, en multipliant toutes ces équations entre elles,

$$\text{Tang. } A^{(n)} = \left\{ \frac{\cos. (i + r)}{\cos. (i - r)} \right\}^n$$

Le dernier azimut $A^{(n)}$ ne peut jamais être 0° , quel que soit le nombre des réflexions; car le rapport des cosinus n'étant pas nul, leur n^{e} puissance ne peut l'être; mais ce rapport étant plus petit que l'unité, ses diverses puissances deviennent de plus en plus petites; et quand l'azimut $A^{(n)}$ n'est plus que de $1/2$ degré environ, les phénomènes se produisent comme s'il était tout-à-fait nul.

M. Brewster a trouvé, par exemple, que la lumière naturelle paraît complètement polarisée après cinq réflexions sur le verre, sous un angle de 70° .

Or, en appliquant la formule à cette expérience, on trouve qu'après cinq réflexions à 70° , l'azimut du plan de polarisation est seulement de $22'$; et en calculant par les formules précédentes l'intensité de la lumière qui n'est pas polarisée dans le plan de réflexion, l'on trouve seulement 0,00008.

Voici le tableau des azimuts après chaque réflexion, et des portions de lumière non polarisées.

	Azimut.	Lumière non polarisée.
Première réflexion à 70°	20.	0,23392
Deuxième.	7 32'	0,03432
Troisième.	2 45.	0,00460
Quatrième.	1.	0,00060
Cinquième.	0 22.	0,00008

Il serait facile, en suivant les principes précédents, de calculer les effets que l'on doit obtenir par des réflexions opérées sous diverses incidences ou sur des substances de diverse nature.

618. *Mouvement du plan de polarisation par l'effet de la réfraction.* — La réfraction peut, comme la réflexion, faire changer ou tourner le plan de polarisation. Cet effet est représenté dans la fig. 744. rq désigne le plan de réfraction d'une lame de verre à faces parallèles; la longueur de cette ligne a été divisée en 90 parties égales, et le numéro de chacune de ces divisions indique l'angle d'incidence du faisceau qui tombe en ce point pour traverser la plaque après s'y être réfracté. Ainsi, le cercle que l'on aperçoit vis-à-vis le $n^\circ 60$, représente un faisceau de lumière polarisée qui tombe sur la première surface de la plaque sous un angle de 60° ; le diamètre az montre la direction du plan de polarisation de ce faisceau lorsqu'il est devenu émergent dans l'air, après avoir traversé les deux surfaces de la plaque; il fait ici $50^\circ 7'$ avec le plan de réfraction. Au point r , ou au numéro 0° , le faisceau tombe à angle droit sur la plaque et la traverse perpendiculairement; l'expérience montre qu'après l'émergence son plan de polarisation est le même qu'à l'incidence. La figure est faite dans la supposition que ce plan fait un angle de 45° avec le plan de réfraction. Mais à mesure que l'obliquité augmente, l'azimut du plan de polarisation augmente graduellement.

Pour une obliquité de 30° , l'azimut est $45^\circ 40'$	
De 45°	$46^\circ 47'$
De 60°	$50^\circ 7'$
De 90°	$68^\circ 19'$

Dans la réflexion, le plan de polarisation se rapprochait du plan d'incidence : ici c'est le contraire; il s'en éloigne de plus en plus, et marque une tendance à lui devenir perpendiculaire. L'effet que l'on observe dans ces expériences est un effet composé, car il résulte de l'action des deux surfaces; pour savoir ce qui appartient à chacune, il faut expérimenter avec des prismes bien purs, et sous de telles incidences que le rayon émerge perpendiculairement à la seconde surface. Alors cette surface sera sans action pour changer l'azimut, et l'effet observé sera entièrement dû à l'action de la première.

M. Brewster, qui paraît avoir le premier analysé ces phénomènes, est parvenu à une formule très simple pour en exprimer la loi. La voici, telle qu'il la donne dans les *Transactions philosophiques* pour 1830, pag. 136 :

$$\text{Cot. } A^1 = \text{Cot. } A. \cos. (i - r).$$

A est l'azimut de plan de polarisation du faisceau incident;

i l'angle d'incidence;

r l'angle de réfraction;

A' l'azimut du plan de polarisation, modifié comme il l'a été par l'action de la première surface.

Nous allons appliquer cette formule au cas d'une lame à faces parallèles, en supposant que le faisceau ait son plan de polarisation dans l'azimut de 45° ; alors $\text{Cot. } A = 1$, et l'on a simplement

$$\text{Cot. } A' = \text{Cos. } (i - r).$$

C'est donc avec cet azimut A' dans son plan de polarisation que le rayon s'en va tomber sur la seconde surface avec un angle d'incidence r ; mais comme l'angle de réfraction est i , et comme $\text{Cos. } (i - r) = \text{Cos. } (r - i)$, le nouvel azimut A'' , après cette seconde réfraction, sera donné par l'équation :

$$\text{Cot. } A'' = \text{Cot. } A' \cdot \text{Cos. } (i - r).$$

En la multipliant par la première, on trouve :

$$\text{Cot. } A' = \text{Cos.}^2 (i - r).$$

M. Brewster a vérifié cette formule par un grand nombre d'observations, sur une plaque de verre pour laquelle $n = 1.510$. On pourra juger de son exactitude par le tableau suivant :

Angle d'incid.	Angle de réfract.	Rotation observée.	Azimut observé.	Azimut calculé.	Différences.
0	0 0'	0 0'	45 0'	45 0'	0
10	6 36	0 13	45 13	45 8	+ 0 7
20	13 5	0 27	46 27	45 25	+ 0 2
25	16 16	0 32	45 32	45 40	- 0 8
30	19 20	0 40	45 40	46 0	- 0 20
35	22 19	1 12	46 12	46 25	- 0 13
40	25 10	1 30	46 30	46 66	- 0 26
45	27 55	1 42	46 47	47 34	+ 0 47
60	30 29	2 48	47 42	48 24	- 0 42
65	33 52	3 64	48 54	48 69	- 0 6
60	35 0	6 7	50 7	50 36	- 0 29
65	38 53	6 48	61 48	62 7	- 0 19
70	38 29	8 7	63 7	63 69	- 0 62
76	39 45	9 55	64 55	66 18	- 1 23
80	40 42	12 16	67 16	69 5	- 1 55
85	41 17	16 45	60 45	82 24	- 1 39
86	41 21	16 20	61 39	63 9	- 1 30
90	41 28	00 00	00 00	00 19	

M. Brewster a pareillement vérifié sa formule en faisant réfracter un faisceau de lumière sous le même angle, mais en variant l'azimut du plan de polarisation depuis 0° à 90° . Il avait choisi l'incidence de 80° , pour laquelle A' était égal à $58^\circ 40'$, lorsque l'azimut primitif était de 45° . Voici les résultats donnés par le calcul et par l'expérience :

Azimut primitif du plan de polarisation.	Azimut observé dans le faisceau émergent.	Azimut calculé pour le rayon émergent.	Différences.
0	0° 0'	0 8	0 0
2 30	7 10	7 20	- 0 10
6	9 40	8 19	+ 1 21
10	17 10	16 25	+ 0 45
16	24 42	24 6	+ 0 36
20	32 30	31 19	+ 1 11
25	39 16	37 54	+ 1 21
30	44 10	43 57	+ 0 13
35	49 38	49 28	+ 0 10
40	54 36	54 31	+ 0 5
45	58 40	59 5	- 0 25
50	63 10	63 19	- 0 9
65	66 68	67 15	- 0 17
60	70 18	70 56	- 0 38
65	74 8	74 24	- 0 16
70	76 66	77 42	- 0 46
76	79 20	80 53	- 1 33
80	83 23	83 58	- 0 35
85	86 23	86 0	+ 0 23
90	90 0	90 0	+ 0 0

La dernière colonne a été calculée par la formule :

$$\text{Cot. } A'' = \text{Cot. } A \cdot \text{Cos.}^2 (i - r).$$

Ces résultats ne semblent laisser aucun doute sur l'exactitude de la loi proposée par M. Brewster.

619. De la polarisation produite par des réfractions successives. — La loi précédente nous apprend comment un faisceau de lumière naturelle peut être polarisée par des réfractions successives. En effet, puisqu'un faisceau naturel d'une intensité égale à 1 peut être considéré comme composé de deux faisceaux d'une intensité égale à $1/2$ polarisés à angle droit, l'un ayant son plan de polarisation à 45° à droite du plan de réfraction, et l'autre à 45° à gauche; il est évident qu'après les deux réfractions au travers d'une lame parallèle de verre sous une incidence de 60° , par exemple (Fig. 744), le faisceau émergent pourra être considéré comme composé de deux faisceaux polarisés à $50^\circ 7'$, l'un à droite et l'autre à gauche du plan de réfraction. C'est ce faisceau ainsi modifié qui vient tomber sur la seconde lame; et après sa seconde émergence, chacun de ses plans de polarisation aura encore tourné d'un certain angle dans le même sens; de même après une troisième émergence, etc.; jusqu'à ce qu'enfin ses deux plans soient exactement opposés et coïncidents. A ce terme, il n'y a plus qu'un plan de polarisation, et le faisceau paraît complètement polarisé dans un plan perpendiculaire au plan de réfraction. Mais ici, comme dans la réflexion, il suffira que les plans opposés de polarisation fassent entre eux un angle assez petit pour que la polarisation complète paraisse sensiblement exacte à l'œil de l'observateur.

M. Brewster avait trouvé, par exemple, dans des expériences publiées en 1814 (*Transactions philosophiques*), que la lumière d'une bougie, à 10 ou 12 pieds de distance, est complètement polarisée

par huit plaques de verre on seize surfaces réfléchissantes sous une incidence de. . . 78° 52'

par 24 ou. . . 48 surfaces, sous 61°

47. 94. 43° 34'.

Et la formule indique que les plans de polarisation faisaient alors avec le plan de réfraction des angles

de 88° 50' pour le premier cas,

80° 35' pour le second,

80° 27' pour le troisième.

Ainsi ces plans s'étaient mathématiquement pas perpendiculaires au plan de réfraction, mais ils l'étaient sensiblement pour l'observateur.

On trouve pareillement que cinq plaques de verre ou dix surfaces polarisent complètement un faisceau naturel qui les traverse sous la plus grande obliquité possible, etc. Ce résultat est vérifié par la formule, puisque l'angle des plans de polarisation avec le plan de réfraction est alors 80° 4'.

Ces résultats expliquent d'une manière bien complète les phénomènes de piles de plaques (609).

Il serait très facile de trouver ici, comme nous l'avons fait pour la lumière réfléchie, l'intensité de la lumière polarisée perpendiculairement au plan d'incidence dans chaque réfraction, et de la comparer à l'intensité de la lumière polarisée par réflexion; mais nous nous bornerons seulement à énoncer cette loi remarquable établie depuis longtemps par M. Arago, d'après une série d'expériences très ingénieuses; savoir :

Que la quantité de lumière polarisée par réfraction est égale à la quantité de lumière polarisée par réflexion.

Cette loi est exacte toutes les fois que l'angle d'incidence du faisceau ne s'écarte pas beaucoup de l'angle de polarisation totale; mais il résulterait des formules de M. Brewster qu'elle serait plus ou moins inexacte pour des angles très éloignés de l'angle de polarisation.

620. *De l'action mutuelle des rayons polarisés.* — Pour compléter les lois générales de la lumière polarisée, il nous reste à faire connaître les phénomènes qui ont été découverts par MM. Arago et Fresnel sur l'action mutuelle des rayons polarisés. Je me fais un devoir de rapporter ici textuellement l'exposition de ces phénomènes telle qu'elle a été publiée par Fresnel :

« En étudiant les interférences des rayons polarisés, nous avons trouvé, M. Arago et moi, qu'ils n'exercent plus d'influence les uns sur les autres quand leurs plans de polarisation sont perpendiculai-

res entre eux, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent plus alors produire de franges, quoique toutes les conditions nécessaires à leur apparition, dans le cas ordinaire, soient d'ailleurs scrupuleusement remplies. Je citerai les trois principales expériences qui nous ont servi à établir ce fait, en commençant par celle qui appartient à M. Arago. Elle consiste à faire traverser au deux faisceaux émanant du même point lumineux et introduit par deux feutes parallèles, deux piles de lames transparentes très minces, telles que celles de mica ou de verre soufflé, qu'on incline assez l'une et l'autre pour polariser presque complètement chacun des deux faisceaux, en ayant soin que les deux plans suivant lesquels on les incline soient perpendiculaires entre eux : alors on ne peut plus apercevoir de franges, quelque soin que l'on prenne d'ailleurs à compenser les différences de marche, en faisant varier très lentement l'inclinaison d'une des piles; tandis que, lorsque les plans d'incidence des piles ne sont plus perpendiculaires entre eux, on parvient toujours à faire paraître les franges. A mesure que ces plans s'éloignent du parallélisme, les franges s'affaiblissent, et elles disparaissent tout-à-fait quand ils sont rectangulaires, si la polarisation des deux faisceaux a été assez complète. Il résulte de cette expérience que les rayons polarisés suivant le même plan s'influencent mutuellement, comme des rayons de lumière non modifiée; mais que cette influence diminue à mesure que les plans de polarisation s'écartent l'un de l'autre, et devient nulle quand ils sont rectangulaires.

« Voici une autre expérience qui conduit aux mêmes conséquences. On prend une lame de sulfate de chaux ou de cristal de roche parallèle à l'axe et d'une épaisseur bien uniforme; on la coupe en deux, et l'on place chacune des moitiés sur une des fentes de l'écran. Je suppose qu'oo ait tourné ces deux moitiés de manière que les bords qui étaient contigus dans la lame avant sa division, soient restés parallèles; les axes le seront aussi. Or, dans ce cas, on n'aperçoit qu'un seul groupe de franges, au milieu de l'espace éclairé, comme avant la division de la lame. Mais si l'on fait tourner l'une de ses moitiés dans son plan, en dérangeant ainsi le parallélisme de leurs axes, on fait naître deux autres groupes de franges plus faibles, situés l'un à droite et l'autre à gauche du groupe du milieu, et qui en sont complètement séparés, dans la lumière blanche, lorsque les lames de cristal de roche ou de sulfate de chaux dont on se sert ont seulement un millimètre d'épaisseur. Il est à remarquer que le nombre de largeur des franges comprises entre le milieu d'un de ces groupes, et celui du groupe central est proportionnel à l'épaisseur des lames, pour des cristaux de même nature, ou dont la double réfraction a la même énergie, comme le cristal de roche et le sulfate de chaux. A mesure que l'angle des deux axes augmente, ces nouveaux groupes de franges deviennent de plus

en plus prononcés, et atteignent enfin leur maximum d'intensité, quand les axes des deux lames sont perpendiculaires entre eux; alors le groupe central, qui s'était affaibli graduellement, a tout-à-fait disparu, et est remplacé par une lumière uniforme. Il faut en conclure que les rayons qui les produisaient par leur interférence ne sont plus capables de s'influencer mutuellement. Il est aisé de voir, d'après la position de ses franges, qu'elles résultaient de l'interférence des rayons qui ont subi le même mode de réfraction dans les deux lames, puisque, les ayant parcourues avec des vitesses égales, ils doivent arriver simultanément dans le milieu de l'espace éclairé, qui répond à des chemins égaux, si d'ailleurs les deux lames sont de même épaisseur et restent toujours l'une et l'autre perpendiculaires aux rayons, comme nous le supposons ici. Ainsi les franges du groupe central étaient formées par la superposition de celles qui résultaient, 1^o de l'interférence des rayons ordinaires de la lame de gauche avec les rayons ordinaires de la lame de droite; 2^o de l'interférence des rayons extraordinaires de la première lame avec les rayons extraordinaires de la seconde. Les deux groupes excentriques au contraire résultent de l'interférence des rayons qui ont subi des réfractions différentes dans les deux lames; et comme ce sont les rayons ordinaires qui marchent le plus vite dans le cristal de roche, ou le sulfate de chaux, on voit que, si l'on emploie une de ces deux espèces de cristaux, le groupe de gauche doit être formé par la réunion des rayons extraordinaires de la lame de gauche avec les rayons ordinaires de la lame de droite, et le groupe de droite par la réunion des rayons extraordinaires de la lame de droite avec les rayons ordinaires de la lame de gauche. Cela posé, il s'agit de déterminer maintenant le sens de polarisation de chacun des faisceaux qui interfèrent, pour en conclure quelles sont les directions relatives des plans de polarisation qui favorisent ou empêchent leur influence mutuelle. L'analogie indique que le mode de polarisation de la lumière doit être dans les lames minces le même que dans les cristaux assez épais pour la diviser en deux faisceaux distincts. Mais comme cette hypothèse peut être l'objet d'une discussion, et contredit même une théorie ingénieuse d'un de nos plus célèbres physiciens, nous ne la présenterons pas d'abord comme un principe certain, et nous aurons recours à une expérience directe pour déterminer les plans de polarisation des rayons ordinaires et extraordinaires qui sortent de ces lames, auxquelles nous avons supposé un ou deux millimètres d'épaisseur. Cette épaisseur suffit pour qu'on puisse tailler un de leurs bords en biseau, et obtenir par cette forme prismatique la séparation des rayons ordinaires et extraordinaires; alors on reconnaît qu'ils sont effectivement polarisés, les premiers suivant la section principale et les autres dans un sens perpendiculaire. Si l'on ne regardait pas en-

core cela comme une preuve suffisante que tel est aussi leur mode de polarisation au sortir de chaque lame, quand ces deux surfaces sont parallèles, on en trouverait une nouvelle démonstration dans les faits que nous venons de décrire, en partant des principes établis par l'expérience de M. Arago, et qui sont d'ailleurs confirmés par celle dont nous allons bientôt parler; si, au contraire, on ne met plus en question le sens de polarisation des rayons ordinaires et extraordinaires, l'expérience actuelle devient une seconde démonstration de ces principes. En effet, lorsque les axes des deux lames étaient parallèles, les rayons qui avaient éprouvé les mêmes réfractions dans ces deux cristaux se trouvaient polarisés suivant la même direction, et ceux de noms contraires suivant des directions rectangulaires; voilà pourquoi le groupe de franges du milieu, qui provient de l'interférence des rayons de même nom, était à son maximum d'intensité, et les deux autres, qui résultent de l'interférence des rayons de noms contraires, ne paraissent pas encore. Mais quand les axes des deux lames formaient entre eux un angle oblique, de 45° par exemple, les rayons de noms contraires et ceux du même nom pouvaient agir à la fois les uns sur les autres, puisque leurs plans de polarisation n'étaient plus rectangulaires, et les trois groupes de franges étaient produits. Lorsqu'enfin les axes devenaient perpendiculaires entre eux, les rayons de même nom se trouvaient polarisés suivant des directions rectangulaires, et le groupe central, auquel ils donnaient naissance, s'évanouit; tandis que les rayons ordinaires de la lame de gauche sont alors polarisés parallèlement aux rayons extraordinaires de la lame de droite; ce qui fait que le groupe de droite, qu'ils produisent, atteint son maximum d'intensité. Il en est de même du groupe de gauche, résultant de l'interférence des rayons ordinaires de la lame de droite avec les rayons extraordinaires de la lame de gauche.

Voici une troisième expérience qui confirme encore les conséquences que nous avons tirées de la première. Ayant fait polir un rhomboïde de spath calcaire sur deux faces opposées, dressées avec soin et bien parallèles, je le senai perpendiculairement à ces faces, et j'obtins de cette manière deux rhomboïdes d'égale épaisseur, et dans lesquels la marche des rayons ordinaires et extraordinaires devait être exactement pareille sous la même incidence. Je les plaçai l'un devant l'autre, de manière que les rayons partis du point lumineux qui avaient traversé le premier rhomboïde parcouressent ensuite le second, en ayant soin que leurs faces fussent perpendiculaires à la direction des rayons incidents; de plus, la section principale du second rhomboïde était perpendiculaire à celle du premier, de sorte que les quatre faisceaux qu'ils produisent en général étaient réduits à deux; le faisceau ordinaire du premier rhomboïde était réfracté extraordinairement dans le second, et le faisceau

extraordinaire de celui-là était réfracté ordinairement dans celui-ci. Il résultait de cette disposition que les différences de marche provenant de la différence de vitesse des rayons ordinaires et extraordinaires se trouvaient compensées pour les deux faisceaux sortans. Ils se croisaient d'ailleurs sous un angle très petit, et tel que les franges devaient avoir une largeur beaucoup plus que suffisante pour être aperçues; et cependant, quoique toutes les conditions nécessaires à la production des franges, pour les circonstances ordinaires, eussent été soigneusement observées, je ne pus jamais parvenir à les faire paraître. Pendant que je les cherchais avec soin en tenant une loupe devant mon œil, je faisais varier lentement la direction d'un des rhomboïdes en le déviant tantôt à droite, tantôt à gauche, afin de compenser l'effet résultant de quelque différence d'épaisseur, s'il s'en trouvait encore; mais malgré ce tâtonnement réitéré un grand nombre de fois, je n'aperçus point de franges; et cela ne doit plus surprendre, d'après ce que les autres expériences nous ont appris, puisque les deux faisceaux sortans se trouvaient polarisés à l'angle droit. Ce qui prouvait bien d'ailleurs que l'absence des franges ne tenait point à la difficulté d'arriver par le tâtonnement à une compensation exacte, c'est que je parvenais aisément à les faire paraître en employant de la lumière qui avait été polarisée avant son entrée dans les rhomboïdes, et eu lui faisant éprouver une nouvelle polarisation après sa sortie. Il est donc complètement démontré, par les expériences que je viens de rapporter, que les rayons polarisés à l'angle droit ne peuvent exercer aucune influence sensible l'un sur l'autre; ou, en d'autres termes, que leur réunion produit toujours la même intensité de lumière, quelles que soient les différences de marche des deux systèmes d'ondes qui interfèrent.

Un autre fait remarquable, c'est qu'une fois qu'ils ont été polarisés suivant des directions rectangulaires, il ne suffit plus qu'ils soient ramenés à un plan commun de polarisation pour qu'ils puissent donner des signes apparemment de leur influence mutuelle. En effet, si dans l'expérience de M. Arago, ou celle que j'ai décrite ensuite, on fait passer les rayons sortis des deux fentes, qui sont polarisés à l'angle droit, au travers d'une pile de glaces inclinées, on n'aperçoit pas de franges, dans quelque direction qu'on tourne son plan d'incidence. Au lieu d'une pile, on peut employer un rhomboïde de spath calcaire; si l'on incline sa section principale de 45° sur les plans de polarisation des faisceaux incidents, de manière qu'elle divise en deux parties égales l'angle qu'ils font entre eux, chaque image contiendra la moitié de chaque faisceau; et ces deux moitiés, ayant le même plan de polarisation dans la même image, devraient y produire des franges, s'il suffisait de ramener les rayons à un plan commun de polarisation pour rétablir les effets apparemment de leur influence mutuelle. Mais on

ne peut jamais obtenir des franges par ce moyen, tant que les rayons n'ont pas été polarisés suivant un même plan, avant d'être divisés en deux faisceaux polarisés à l'angle droit.

» Lorsque la lumière a éprouvé cette polarisation préalable, au contraire, l'interposition du rhomboïde fait disparaître les franges. La direction la plus avantageuse à donner au plan primitif de polarisation est celle qui divise en deux parties égales l'angle des plans rectangulaires suivant lesquels les deux faisceaux sont polarisés en second lieu, parce qu'alors la lumière incidente se partage également entre eux. Supposons, pour fixer les idées, que le plan de la polarisation primitive soit horizontal, il faudra que les plans de la polarisation suivante, imprimée à chacun des deux faisceaux, soient inclinés de 45° sur le plan horizontal, l'un en-dessus, l'autre en-dessous, de sorte qu'ils restent perpendiculaires. On peut obtenir cette polarisation rectangulaire, soit à l'aide des deux petites piles employées dans l'expérience de M. Arago, soit avec deux lames, dont les axes sont disposés rectangulairement, soit enfin avec une seule lame cristallisée : nous ne considérerons que ce dernier cas, les deux autres présentant des phénomènes absolument analogues.

» Pour diviser la lumière en deux faisceaux qui se croisent sous un petit angle, et qui puissent ainsi faire naître des franges, l'appareil des deux miroirs est généralement préférable à l'écran percé de deux fentes, parce qu'il produit des franges plus brillantes; il a d'ailleurs ici l'avantage de donner immédiatement aux deux faisceaux la polarisation préalable nécessaire à notre expérience; il suffit pour cela que les deux miroirs soient de verre non étamé, et inclinés de 35° environ sur les rayons incidents; il faut avoir soin de les noircir par derrière, pour détruire la seconde réflexion. On place près d'eux, dans le trajet des rayons réfléchis, et perpendiculairement à leur direction, une lame de sulfate de chaux ou de cristal de roche, parallèle à l'axe, d'un ou deux millimètres d'épaisseur, en inclinant sa section principale de 45° sur le plan de la polarisation primitive, que nous avons supposé horizontal. L'appareil étant ainsi disposé, on ne verra qu'un seul groupe de franges au travers de la lame, comme avant son interposition, et il occupera la même position. Mais si l'on met devant la loupe une pile de glaces inclinées dans un sens horizontal ou vertical, on découvrira, de chaque côté du groupe central, un autre groupe de franges, qui en sera d'autant plus éloigné que la lame cristallisée sera plus épaisse. Remplace-t-on la pile de glaces par un rhomboïde de spath calcaire, dont la section principale est dirigée horizontalement ou verticalement, l'on voit, dans chacune des deux images qu'il produit, les deux systèmes de franges additionnels que l'interposition de la pile de glaces avait fait naître; et il est à remarquer que ces deux

images sont complémentaires l'une de l'autre, c'est-à-dire que les bandes obscures de l'une répondent aux bandes brillantes de l'autre.

« Nous voyons dans cette expérience une nouvelle confirmation des principes démontrés par les précédentes. Les rayons qui ont éprouvé des réfractions de noms contraires ne peuvent s'influencer, parce que, sortant de la même lame, dans le cas que nous considérons maintenant, ils se trouvent polarisés suivant des directions rectangulaires; en conséquence, les groupes de droite et de gauche ne peuvent exister, à moins qu'on ne rétablisse l'influence mutuelle de ces rayons en les ramenant à un plan commun de polarisation; c'est ce que fait l'interposition de la pile de glaces ou du rhomboïde. Les franges ainsi produites sont d'autant plus prononcées que les deux faisceaux de noms contraires qui concourent à leur formation sont plus égaux en intensité; et voilà pourquoi la direction de la section principale du rhomboïde qui fait un angle de 45° avec l'axe de la lame est la plus favorable à l'apparition des franges. Quand la section principale du rhomboïde est parallèle ou perpendiculaire à celle de la lame, les rayons réfractés ordinairement par la lame passent en entier dans une image, au lieu de se partager entre les deux, et tous les rayons extraordinaires passent dans l'autre image, en sorte qu'il ne peut plus y avoir interférence entre eux; et les groupes additionnels disparaissent :

chaque image ne présente plus que les franges qui résultent de l'interférence des rayons de même nom, c'est-à-dire celles qui composent le groupe central.

« Ces deux groupes de franges additionnelles que présentait la lumière polarisée dans la première position du rhomboïde, fournissent un des moyens les plus précis de mesurer la double réfraction et d'en étudier la loi. En effet, leur position excentrique tient à la différence de marche des rayons ordinaires et extraordinaires qui sont nantis de la lame; et l'on peut juger du nombre d'ondulations dont les rayons extraordinaires du faisceau de droite sont restés en arrière des rayons ordinaires de gauche, par le nombre de larges franges comprises entre le milieu du groupe de droite et celui du groupe central : on détermine encore mieux cette différence de marche, en mesurant l'intervalle compris entre les milieux des deux groupes extrêmes, qui est le double de leur distance au milieu du groupe central. C'est la lumière blanche qu'il est le plus commode d'employer dans ces sortes d'observations; d'abord, parce qu'elle est plus vive, et, en second lieu, parce qu'elle rend la bande centrale de chaque groupe plus facile à reconnaître. Comparant ensuite l'épaisseur de la lame à la différence de marche observée, on en conclut le rapport des vitesses des rayons ordinaires et extraordinaires. »

CHAPITRE IV.

COULEURS DE LA LUMIÈRE POLARISÉE.

621. Les plus brillants phénomènes de l'optique sont incontestablement les phénomènes de coloration que présente la lumière polarisée. C'est une vaste carrière qui fut ouverte (en 1811) par les belles observations de M. Arago, et qui a été rapidement parcourue par les physiciens français et étrangers. Dans l'impossibilité de discuter ici les titres de chacun, et de faire de ces recherches une exposition qui soit à la fois historique et méthodique, nous nous contenterons de dire que les observateurs auxquels on doit les principales découvertes dans cette partie de la science, sont, en France : MM. Arago, Biot et Fresnel; en Angleterre, MM. Young, Brewster et Herschell; et en Allemagne, MM. Seebeck et Mitscherlich. Tout ce que l'on a écrit sur cette matière formerait peut-être plus de dix volumes in-4°, parce que les faits se présentaient d'abord sous des apparences si compliquées, qu'il était à peu près impossible d'en faire l'analyse en peu de paroles. Mais Fresnel s'est élevé

jusqu'à la véritable cause des phénomènes : il a tout simplifié, et, en le prenant pour guide, nous essaierons de présenter dans un petit nombre de pages, tous les résultats auxquels on est parvenu jusqu'à ce jour. Ce chapitre offre par lui-même infiniment d'attrait et d'intérêt; mais, nous devons le dire d'avance, il est difficile, et après avoir fait tous nos efforts pour le rendre élémentaire, nous sentons qu'il exige encore de la part du lecteur une attention bien soutenue. Pour réduire les difficultés autant qu'il est en nous, nous ferons cinq divisions; nous étudierons successivement :

- 1° Les teintes colorées des lames cristallisées;
- 2° Les anneaux colorés des lames cristallisées.
- 3° La polarisation circulaire;
- 4° Les couleurs des verres trempés;
- 5° L'absorption de la lumière polarisée.

Teintes colorées des lames cristallisées.

622. Description générale du phénomène. — Les

vives couleurs qui se développent, sous certaines conditions, dans les lames cristallisées, ont été découvertes et étudiées par M. Arago en 1811, peu de temps après que Malus eut découvert la polarisation de la lumière (*Mém. de l'Inst.*, 1811, première partie).

Voici les premières observations dans lesquelles ces couleurs se sont manifestées.

Une lame mince de mica ou de chaux sulfatée paraît incolore et parfaitement diaphane, lorsqu'on la regarde à l'œil nu contre un ciel pur et sans nuages, mais, si pour la regarder, on place au devant de l'œil un prisme bi-réfringent, on la voit, en général, prendre dans toute son étendue une teinte uniforme et brillante. Le prisme bi-réfringent la fait paraître double, et ses deux images colorées sont toujours complémentaires; car l'espace où elles se superposent, en empiétant l'une sur l'autre, est exactement blanc. La vivacité des couleurs dépend de la région du ciel que l'on regarde, ou plutôt de sa position par rapport à la route du soleil; et les couleurs ne se montrent jamais, quand on dirige l'observation vers un point couvert de nuages. On peut remarquer en outre que l'épaisseur de la lame, et son obliquité par rapport au faisceau de lumière qui vient à l'œil, sont des circonstances qui font changer la nuance des couleurs, tandis que la position, par rapport à la section principale du prisme, en fait changer seulement l'intensité.

Cette observation doit paraître bien extraordinaire; mais, lorsqu'on sait que la lumière bleue du ciel est plus ou moins polarisée dans les diverses régions, et même aux différentes heures de la journée, il est naturel d'attribuer à la polarisation les couleurs qui se développent ainsi dans les lames cristallisées. C'est en effet ce qui se trouve démontré directement par l'expérience suivante.

La lumière des nuées, ou celle d'une flamme est réfléchi sur un verre noir mn' (Fig. 745), sous l'angle de la polarisation; le faisceau réfléchi traverse un diaphragme na' , et on le regarde avec un prisme bi-réfringent $r'r'$ placé au devant de l'œil. Nous savons que l'ouverture du diaphragme donne alors une seule image, quand l'angle de la section principale du prisme et du plan de polarisation est 0° ou 90° ; qu'il donne deux images également intenses, quand cet angle est 45° ; et enfin, deux images inégales, quand cet angle est compris entre 0° et 45° , ou entre 45° et 90° . Nous savons de plus que, dans tous les cas, ces images sont incolores. Maintenant, si l'on adapte dans l'ouverture du diaphragme un petit anneau sa' (Fig. 746) portant une lame mince cristallisée st' ; cette lame, qui est naturellement diaphane et sans couleur, paraît ici colorée de nuances plus ou moins vives; et les couleurs de ses deux images sont toujours complémentaires; car, si elles sont assez larges ou assez peu écartées l'une de l'autre pour se superposer en partie, l'espace où elles se superposent est toujours d'un blanc parfait. Au lieu de regarder l'image de

l'ouverture avec un prisme bi-réfringent, on pourrait la regarder avec une tourmaline ou avec une glace ajustée pour tourner autour du faisceau polarisé, en le recevant toujours sous l'angle de polarisation. A l'œil nu l'image paraît toujours blanche.

Toutes les lames cristallisées présentent, sous ce rapport, des phénomènes analogues, soit qu'elles proviennent d'un cristal à un axe, ou d'un cristal à deux axes, soit qu'elles conservent leurs faces naturelles, ou qu'elles aient été taillées dans différents sens; mais il y a toujours une certaine limite d'épaisseur au delà de laquelle tous les phénomènes disparaissent; et même, au-dessous de cette limite, il y a toujours pour chaque lame certaines positions où elle cesse d'être colorée. Nous allons essayer d'établir de l'ordre dans cette étonnante complication d'apparences si variées; il nous suffit pour cet instant d'avoir indiqué le fait général, qui peut se résumer de la manière suivante :

Un faisceau de lumière blanche polarisée qui traverse, sous certaines conditions, une lame cristallisée, paraît coloré de diverses teintes, lorsqu'il se réfléchit ensuite sous l'angle de polarisation, ou lorsqu'il se réfracte dans un corps doué de la double réfraction.

L'appareil que nous devons employer dans cette étude étant nécessairement un peu compliqué, nous devons, avant tout, en donner la description.

aac et $a'a'c'$ représentent deux barres semblables, disposées parallèlement et liées entre elles de manière à former une espèce de rectangle allongé (Fig. 747 et 748). Ce rectangle est soutenu vers le milieu de ses grands côtés, aux points s et s' ; et il peut tourner autour de ces points, comme une lunette sur son pied.

mn est le réflecteur de verre noirci ou d'obsidienne, qui doit polariser la lumière; il tourne autour des points c et c' ; un cercle divisé v marque son inclinaison; et la vis de pression v' sert à l'arrêter, lorsqu'il a l'obliquité convenable.

$r'r'$ est le tube destiné à recevoir le rayon polarisé; les deux extrémités sont munies de diaphragmes dont l'ouverture a 2 ou 3 lignes de diamètre. L'axe de ce tube est l'axe central de tout le système.

Les appareils x et x' sont les supports des lames cristallisées; ils sont exactement semblables; et il suffit d'en décrire un seul, x par exemple. Ce support se compose de trois pièces mobiles : 1^o le disque y , qui peut tourner dans son plan; 2^o la plaque xx' , qui peut tourner autour des deux pivots x et x' ; 3^o le châssis uu , qui peut tourner autour de l'axe central, au moyen des douilles o et o' . La lame cristallisée z est fixée avec un peu de cire molle sur l'ouverture a percée au centre du disque y ; et là elle peut recevoir trois mouvements, donnés par chacune des trois pièces mobiles :

1^o. Le mouvement de son axe, qui s'obtient en faisant tourner le disque y dans son propre plan ;

sa rotation est mesurée sur le cercle divisé $\alpha\beta$.

2°. *Le mouvement de son plan*, qui s'obtient en faisant tourner la plaque $\kappa\kappa$ autour des deux points $x\lambda$; sa rotation est mesurée par le cercle divisé $c\eta$.

3°. *Le mouvement de sa section principale*, qui s'obtient en faisant tourner le châssis $\mu\mu$ autour des douilles o et o' ; sa rotation est mesurée par un cercle divisé $\mu\mu$ qui porte l'un des bouts du châssis du rectangle $\mu\mu$.

La lame t' qui se trouve sur le support x' , a exactement les mêmes mouvements, et ils sont indépendants de ceux de la lame t .

Dans la figure 747, la plaque $\kappa\kappa$ du support x , et la plaque semblable du support x' sont dans une position qu'elles ne prennent jamais, vu qu'elles arrêteraient le rayon polarisé; il faut les relever par la pensée et les faire tourner autour de leurs pivots; une rotation de 90° , par exemple, rendrait les lames perpendiculaires au rayon. Enfin la plaque circulaire $\alpha\alpha$, qui termine le rectangle, est divisée en x sur son limbe; et une espèce d'alidade, qui porte le prisme bi-réfringent, peut en parcourir toute la circonférence, et donner ainsi toutes les positions possibles à la section principale de ce prisme, par rapport au plan primitif de polarisation. Cette alidade peut recevoir une tourmaline, au lieu d'un prisme bi-réfringent; elle pourrait recevoir aussi un miroir de verre faisant l'office de la seconde glace dont nous avons parlé précédemment.

Cet appareil peut aussi tenir lieu des appareils que nous avons décrits dans les figures 735, 736, 737 et 738. Il suffit pour cela d'élever les lames t et t' , et d'ajouter successivement, au lieu du réflecteur $\mu\mu$, un prisme bi-réfringent, ou une pile de glace.

623. *Cristaux à un axe recevant le faisceau perpendiculairement à l'axe.*

L'appareil précédent est ajusté pour que le faisceau réfléchi dans l'intérieur du tube $\tau\tau'$ soit complètement polarisé, soit qu'on se serve de la lumière des vécés ou de la flamme d'une lampe ou d'une bougie. La polarisation complète se reconnaît au moyen du prisme $\tau\tau'$ pour cela on met perpendiculairement au faisceau réfléchi des plaques $\kappa\kappa$ et $\kappa'\kappa'$ des supports x et x' ; on ne place aucune lame sur les ouvertures centrales des disques $\alpha\eta\alpha'$; et le faisceau arrive ainsi directement sur le prisme $\tau\tau'$, où il donne naissance à deux images plus ou moins intenses, suivant que la section principale de ce prisme fait un angle plus ou moins grand avec le plan de polarisation.

Lorsque l'une des images est tout-à-fait insensible pour une position donnée du prisme, c'est une preuve que la polarisation est complète, et l'on est assuré en même temps que la section principale du prisme est alors parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion; il est parallèle, si c'est l'image ordinaire qui reste, et perpendiculaire, si c'est l'image es-

traordinaire. L'aspect du prisme et la disposition des images peuvent servir à lever le doute. Les choses étant ainsi disposées, on ajuste sur l'ouverture α de l'un des disques, une lame cristallisée parallèle à l'axe; par exemple, une lame de cristal de roche qui ait moins de 45 centièmes de millimètre d'épaisseur. Ces lames sont collées sur des plaques de verre pour être amenées par le travail à ce degré de minceur, alors on regarde de nouveau au travers du prisme les apparences du faisceau polarisé; et voici les phénomènes que l'on observe.

1°. En supposant que la section principale du prisme soit dans le plan de polarisation primitive, c'est-à-dire, dans le plan de réflexion, l'image ordinaire et l'image extraordinaire sont toutes deux *visibles et colorées*; leurs couleurs sont exactement complémentaires. En faisant tourner le disque α sur son plan pour changer la position de l'axe de la lame, on voit la nuance des couleurs rester la même pour chaque image; mais l'éclat change graduellement, et l'on trouve bientôt une position pour laquelle l'une des images disparaît, et l'autre devient blanche. Notons ce point comme point de départ, et continuons de tourner dans le même sens; alors les couleurs reparaissent avec leur teinte; puis, leur éclat augmente peu à peu pour diminuer ensuite, jusqu'à une nouvelle position où l'image qui était blanche tout à l'heure, est complètement effacée, tandis que l'autre est blanche à son tour. Pour passer de la première position à la seconde, l'axe de la lame décrit un quart de circonférence; le deuxième, le troisième et le quatrième quart de circonférence offrent exactement le même phénomène; et il est facile de constater que les quatre positions pour lesquelles les deux images colorées se réduisent à une seule image blanche se reproduisent exactement quand la section principale de la lame est parallèle ou perpendiculaire à la section principale du prisme. Ainsi, les phénomènes peuvent se résumer de la manière suivante.

Quand la section principale de la lame coïncide avec la section principale du prisme et avec le plan primitif de polarisation, il n'y a qu'une seule image, qui est blanche; et c'est l'image ordinaire.

Quand la section principale de la lame est perpendiculaire à la section principale du prisme et au plan primitif de polarisation, il n'y a qu'une seule image, qui est blanche, et c'est l'image extraordinaire.

Dans toutes les positions intermédiaires il y a deux images, toujours colorées de la même nuance et toujours complémentaires; elles prennent leur plus vif éclat quand la section principale de la lame fait un angle de $1/3$, $2/3$, $5/3$ ou $7/3$ quadrans avec la section principale du prisme.

2°. Si la section principale du prisme est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, on observe des phénomènes analogues; seulement l'image ordinaire prend la place de l'image extraordinaire et vice versa.

3°. Quand la section principale du prisme n'est ni parallèle ni perpendiculaire au plan de polarisation primitive, on observe encore les mêmes phénomènes, savoir : une image nulle et l'autre blanche, quand les deux sections principales du prisme et de la lame sont parallèles ou perpendiculaires entre elles ; maximum d'éclat dans les couleurs, quand les sections font un angle mesuré par un nombre impair de demi-quadrans ; et toujours les mêmes nuances, plus ou moins affaiblies, dans toutes les positions intermédiaires.

Les lames de cristal de roche, plus épaisses qu'un demi-millimètre environ, ne donnent plus que des teintes très affaiblies ; mais toutes les lames plus ou moins minces donnent des nuances différentes, et qui sont, en général, d'autant plus vives que l'épaisseur est moindre. En étudiant les franges diffractées et les anneaux colorés, nous avons vu qu'il y a, pour chaque couleur simple, des franges ou des anneaux du premier ordre, du second ordre, etc., auxquels correspondent dans la lumière blanche des teintes composées différentes ; ce qui donne des rouges de différents ordres, des oranges de différents ordres, etc. Or, en étudiant les teintes des lames cristallisées, de même substance et d'épaisseur variable, M. Biot a reconnu que ces mêmes périodes se reproduisent ; c'est-à-dire, qu'en graduant convenablement les épaisseurs, on peut former une série de lames qui donnent, par exemple, la première, le rouge du premier ordre ; la deuxième, le rouge du second ordre ; la troisième, le rouge du troisième ordre, etc. Et, en comparant ces diverses épaisseurs, M. Biot s'est assuré qu'elles suivent la série des nombres naturels 1, 2, 3, 4, etc. Au moyen de cette loi simple et remarquable, il suffit donc de connaître à quelle épaisseur absolue se forme, dans une substance cristalline, une teinte bien définie, pour assigner quelle teinte sera produite par une autre épaisseur quelconque, ou quelle épaisseur il faudrait pour produire telle autre teinte donnée.

Les cristaux à un axe peuvent à cet égard offrir de très grandes différences ; car M. Biot trouve, par exemple, qu'une lame de chaux carbonatée parallèle à l'axe devrait être dix-huit fois plus mince qu'une lame de cristal de roche, aussi parallèle à l'axe, pour donner la même teinte. C'est pourquoi il est à peu près impossible d'étudier ces phénomènes dans la chaux carbonatée.

624. Théorie de Fresnel sur les couleurs des lames cristallines

M. Biot, après avoir fait un grand nombre de recherches expérimentales très précises sur les couleurs des lames cristallisées, était parvenu à lier tous les phénomènes par une théorie qui est connue dans la science sous le nom de *théorie de la polarisation mobile*. Les physiciens pourront sans doute consulter avec intérêt et pendant long-temps encore cette ingénieuse théorie ; mais comme elle repose essentiellement sur diverses hypothèses

inhérentes au système de l'émission, elle est au jourd'hui comme la théorie des accés de Newton, elle ne représente plus ni la vérité des faits ni la vérité des causes. Cependant les résultats précis auxquels M. Biot était parvenu, et même l'enchaînement qu'il avait établi entre eux, ont servi de point de départ à Fresnel pour fonder une autre théorie sur le système des vibrations. Cette théorie de Fresnel est à la fois si vaste et si importante qu'il m'a paru indispensable de donner au moins une idée des principes sur lesquels elle repose.

Le petit cercle de la figure 749, dont le centre est en c, représente la coupe perpendiculaire d'un faisceau de lumière polarisée ; rr' est la direction de son plan primitif de polarisation.

Ce faisceau rencontre d'abord, sous l'incidence perpendiculaire, une lame cristallisée, taillée parallèlement à l'axe ; ll' est la direction de la section principale de cette lame ; elle fait un angle a avec la ligne rr' du plan de polarisation, aa' est une perpendiculaire à ll' .

Après avoir traversé la lame, le faisceau vient tomber sur un rhomboïde ou sur un prisme biréfringent dont la section principale est dirigée suivant aa' ; elle fait un angle b avec la ligne rr' du plan de polarisation.

aa' est une perpendiculaire à la section principale $a'x'$ du rhomboïde.

Essayons de déterminer et les images qui seront produites, et leur intensité relative, et l'action mutuelle que les faisceaux ordinaires et extraordinaires exerceront les uns sur les autres.

Représentons par i l'intensité du rayon polarisé à l'instant où il tombe sur la lame cristallisée.

En traversant la lame, le faisceau se décompose en deux autres, l'un ordinaire et l'autre extraordinaire, qui ont pour intensité,

Le premier. . . $\text{Cos.}^2 a \cos^2 b$ polarisé suivant cl ;

Le second. . . $\text{Sin.}^2 a \sin^2 b$ polarisé suivant ca' .

Mais la lame est beaucoup trop mince pour qu'il y ait entre eux une séparation sensible.

En traversant le rhomboïde, chacun de ces faisceaux élémentaires se décompose encore en deux autres :

$\text{Cos.}^2 a$ donne $\begin{cases} \text{Cos.}^2 a \cos^2 (a-b) = r_{1,1} \text{ polarisé suivant } ca \\ \text{Cos.}^2 a \sin^2 (a-b) = r_{1,2} \text{ polarisé suivant } cl \end{cases}$

$\text{Sin.}^2 a$ donne $\begin{cases} \text{Sin.}^2 a \sin^2 (a-b) = r_{2,1} \text{ polarisé suivant } ca \\ \text{Sin.}^2 a \cos^2 (a-b) = r_{2,2} \text{ polarisé suivant } cl \end{cases}$

Les deux portions polarisées suivant ca prennent la même direction pour arriver à l'œil, et composent l'image ordinaire ; il en est de même des deux portions polarisées suivant cl et ca' , qui composent l'image extraordinaire. Il en résulte donc les éléments suivants :

Pour l'image ordinaire $\begin{cases} \text{Cos.}^2 a \cos^2 (a-b) = r_{1,1} \\ \text{Sin.}^2 a \sin^2 (a-b) = r_{2,1} \end{cases}$

Pour l'image extraord. $\begin{cases} \cos. a \sin. a (a-b) = r_{e1} \\ \sin. a \cos. a (a-b) = r_{e2} \end{cases}$

On croirait d'abord que les éléments de chacune de ces images doivent simplement s'ajouter entre eux pour composer, en définitive, soit l'image ordinaire, soit l'image extraordinaire; mais il faut prendre garde que les deux éléments de chaque image n'ont pas la même vitesse: en effet dans l'image ordinaire, par exemple, le faisceau r_{e1} a subi la réfraction ordinaire dans la lame et dans le rhomboïde, tandis que le faisceau r_{e2} a subi la réfraction extraordinaire dans la lame et la réfraction ordinaire dans le rhomboïde: les vitesses ordinaire et extraordinaire étant différentes, il en résulte donc un avance ou un retard de l'un des faisceaux élémentaires sur l'autre, et par conséquent une concordance ou une discordance de vibrations, qui peuvent être plus ou moins complètes, comme si ces faisceaux avaient en réalité parcouru des chemins plus ou moins inégaux.

Soit x le chemin parcouru par le 1^{er} faisceau r_{e1}
 x' le chemin parcouru par le 2^e faisceau r_{e2}

$x - x'$ sera la différence des chemins parcourus; et, dans ce cas, Fresnel démontre (*Ann. de phys. et de chim.*, tom. II, pag. 258) que l'intensité totale, au lieu d'être représentée par la somme des faisceaux composans ou par la somme des carrés de leur vitesse, se trouve représentée par cette somme, plus le double produit de ces vitesses multiplié par

$$\cos. 2\pi \frac{e}{d}$$

π est la demi-circonférence dont le rayon est 1.

e est la différence des chemins parcourus qui est ici $x - x'$.

d est la longueur d'une ondulation pour l'espèce de lumière que l'on considère.

Il est facile de voir d'après cela, que l'intensité devient enfin pour l'image ordinaire

$$\cos. a \sin. a (a-b) + \sin. a \cos. a (a-b) + 2 \cos. a \sin. a (a-b) \sin. a \cos. a \left(\frac{x-x'}{d} \right)$$

L'intensité de l'image extraordinaire se trouve par les mêmes principes; seulement, Fresnel a démontré qu'à la différence des chemins parcourus par les deux faisceaux composans, il faut ajouter une demi-ondulation quand leurs plans de polarisation continuent de s'éloigner l'un de l'autre, considérés d'un seul côté de leur commune intersection jusqu'à ce qu'ils se soient placés sur le prolongement l'un de l'autre. Or les deux faisceaux r_{e1} et r_{e2} qui constituent l'image extraordinaire, sont polarisés, l'un suivant ca , l'autre suivant ca' , prolongement de ca ; il faut donc, à la différence $x - x'$ des chemins qu'ils ont parcourus dans la lame, ajouter une demi-ondulation, qui se trouve encore perdue par le renversement du plan de polarisation.

Par conséquent, à la somme des intensités, ou à la somme des carrés des vitesses, il faut ajouter le produit de ces vitesses multiplié par

$$\cos. 2\pi \left(\frac{x-x'}{d} + \frac{1}{2} \right) = - \cos. 2\pi \left(\frac{x-x'}{d} \right)$$

Ce qui donne pour l'intensité de l'image extraordinaire

$$\cos. a \sin. a (a-b) + \sin. a \cos. a (a-b) - 2 \cos. a \sin. a (a-b) \sin. a \cos. a \left(\frac{x-x'}{d} \right)$$

ou,

$$\begin{aligned} & (\sin. a \cos. a (a-b) - \sin. a (a-b) \cos. a) \\ & + 2 \sin. a \cos. a (a-b) \sin. a (a-b) \cos. a \\ & - 2 \cos. a \sin. a (a-b) \sin. a \cos. a \left(\frac{x-x'}{d} \right) \end{aligned}$$

ou enfin,

$$\sin. a \sin. 2a \sin. 2(a-b) \sin. a \left(\frac{x-x'}{d} \right)$$

Telles sont, dit Fresnel, les formules générales qui donnent l'intensité de chaque espèce de lumière homogène dans les images ordinaire et extraordinaire en fonction de la longueur d'ondulation et de la différence des chemins parcourus $x - x'$ par les rayons qui ont traversé la lame cristallisée. Connaissant son épaisseur et les vitesses des rayons ordinaires et des rayons extraordinaires dans la cristalline, il sera facile de déterminer $x - x'$. Dans le cristal de roche et dans la plupart des cristaux doués de la double réfraction, $x - x'$ n'éprouve que de très légères variations en raison de la différence de nature des rayons lumineux; en sorte qu'on peut le regarder comme une quantité constante pour tous les cristaux où la dispersion de double réfraction est très petite, relativement à la double réfraction. Si après avoir calculé la différence de marche $x - x'$, on la divise successivement par la longueur moyenne d'ondulation de chacune des sept principales espèces de rayons colorés, et si l'on substitue successivement ces différens quotiens dans les expressions ci-dessus, on aura les intensités de chaque espèce de rayons colorés dans les images ordinaire et extraordinaire, et l'on pourra déterminer alors les teintes de ces images par la formule empirique que Newton a donnée pour trouver la couleur résultant d'un mélange quelconque de rayons divers dont on connaît les intensités relatives. C'est pourquoi l'on doit considérer les formules générales qui donnent l'intensité de chaque espèce de lumière homogène en fonction de sa longueur d'ondulation, comme l'expression même de la teinte produite par la lumière blanche.

Revenons maintenant aux deux formules générales, pour les discuter dans quelques cas particuliers.

Image ordinaire :

$$\cos. \delta - \sin. 2 a \sin. 2 (a - b) \sin. \pi \left(\frac{x - x'}{d} \right)$$

Image extraordinaire :

$$\sin. \delta + \sin. 2 a \sin. 2 (a - b) \sin. \pi \left(\frac{x - x'}{d} \right)$$

1° La somme des intensités des deux faisceaux reproduit l'intensité primitive qui a été prise pour unité;

2° Sous l'incidence perpendiculaire, que nous considérerons ici, la différence des chemins parcourus est, dans tous les cristaux, proportionnelle à l'épaisseur; et, dans chaque cristal, elle dépend en outre de la différence des vitesses du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire, ou des indices de réfraction correspondants à ces deux espèces de rayons. Dans un cristal où les indices seraient presque égaux, il faudrait une grande épaisseur pour obtenir, par exemple, le rouge du premier ordre; tandis, que pour obtenir la même nuance, il ne faudrait qu'une épaisseur très petite si les indices ordinaire et extraordinaire étaient fort différents;

3° Quand la différence des chemins parcourus est égale à un très grand nombre d'ondulations, les images sont blanches, comme dans la théorie des lames minces et par la même raison. Ces cas exceptés, les images peuvent encore être blanches pour d'autres raisons que nous allons examiner;

4° La condition nécessaire pour qu'il n'y ait pas de couleur dans les images est évidemment que le terme qui varie avec la longueur des ondulations soit nul, puisque alors les rayons de toutes les couleurs auront des intensités égales et produiront du blanc. La condition de la blancheur des images est donc exprimée par :

$$\sin. 2 a \sin. 2 (a - b) = 0;$$

et elle ne peut être remplie que par :

$$a = 0, a = 14, a = 24, a = 34,$$

ou par :

$$\delta = a, \delta = 14 + a, \delta = 24 + a, \delta = 34 + a.$$

Ainsi les images sont toujours blanches, premièrement quand la section principale de la lame est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation.

Secondement, quand la section principale de la lame est parallèle ou perpendiculaire à la section principale du rhomboïde. C'est ce qu'il était facile de voir *a priori*, puisque, dans le premier cas, le faisceau n'éprouve qu'une seule réfraction en traversant la lame; et, dans le second cas, il n'éprouve qu'une seule réfraction en traversant le rhomboïde;

5° La condition nécessaire pour que les images soient colorées des plus vives nuances est évidemment que le terme qui varie avec les longueurs d'ondulations atteigne son maximum; et cela arrive

quand son co-efficient est égal à l'unité, ou quand on a :

$$\sin. 2 a \sin. 2 (a - b) = 1.$$

Cette condition est remplie par :

$$a = 45^\circ, \text{ et } b = 0^\circ.$$

Ce qui donne :

$$\text{Image ordinaire, } \cos. \delta = \left(\frac{x - x'}{d} \right)$$

$$\text{Image extraordinaire, } \sin. \delta = \left(\frac{x - x'}{d} \right)$$

Ainsi les plus vives couleurs s'observent quand l'axe de la lame fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, et quand en même temps la section principale du rhomboïde est parallèle à ce plan. C'est en effet ce qui est confirmé par l'expérience;

6° La plan définitif de polarisation peut facilement être déterminé d'une manière générale dans l'une et l'autre image.

Si la différence des chemins parcourus est égale à 0° ou à un nombre pair de demi-ondulations, on a :

$$x - x' = \frac{2nd}{2}, \text{ ou } \frac{x - x'}{d} = n.$$

n pouvant recevoir toutes les valeurs entières, 0, 1, 2, etc., on a :

$$\sin. \pi \left(\frac{x - x'}{d} \right) = \sin. \pi n = 0.$$

Ainsi pour $b = 0$, l'image extraordinaire s'évanouit, tandis que l'image ordinaire devient égale à 1, et celle-ci est alors à son émergence polarisée complètement dans le plan primitif de polarisation.

Si la différence des chemins parcourus est égale à un nombre impair de demi-ondulations, on a :

$$x - x' = (2n + 1) \frac{d}{2},$$

$$\text{ou, } \frac{x - x'}{d} = \left(\frac{2n + 1}{2} \right)$$

$$\text{et } \sin. \pi \left(\frac{x - x'}{d} \right) = \sin. \pi \left(\frac{2n + 1}{2} \right) = 1.$$

Ainsi, pour $b = 2a$, l'image extraordinaire disparaît encore, tandis que l'image ordinaire devient égale à 1; et celle-ci se trouve alors à son émergence, complètement polarisée dans l'axe $2a$, ou dans la section principale du rhomboïde.

Si la différence des chemins parcourus n'est ni un nombre pair ni un nombre impair de demi-ondulations, il n'y a plus d'images qui puisse disparaître, et les faisceaux émergents sont alors polarisés dans différents sens.

Tous les résultats des formules sont en effet conformes à l'expérience.

Ces notions sont suffisantes pour faire comprendre les principes à la fois simples et féconds sur lesquels Fresnel a fondé sa belle théorie des couleurs des lames cristallisées. Nous n'entreprendrons pas d'appliquer ces mêmes principes aux cas beaucoup plus compliqués que nous devons encore examiner. Mais il était important d'indiquer la véritable cause de ces phénomènes, et de faire voir que l'inégale vitesse des rayons ordinaire et extraordinaire détermine des avances ou des retards entre les diverses ondulations, et par conséquent des interférences qui développent les couleurs.

625. *Cristaux à un axe recevant le faisceau obliquement.* — Concevons une lame cristallisée dont les deux faces aient été taillées parallèlement à l'axe; soit LL' (Fig. 750) la direction de l'axe, et mn' une perpendiculaire à cette direction; cette lame est disposée sur l'un des supports de l'appareil précédent (Fig. 747). LL' ou la section principale fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation; le faisceau polarisé qui la traverse est examiné avec un rhomboïde ou un prisme biréfringent dont la section principale coïncide avec le plan de polarisation. Nous savons que les couleurs prennent alors leur plus vif éclat. Supposons maintenant que l'on incline la lame sur le faisceau polarisé; et, pour fixer les idées, nous la ferons tourner seulement dans deux sens, autour de LL' et autour de mn' .

1°. Quand on fait tourner la lame autour de l'axe LL' , la réfraction ne cessant pas de s'accomplir dans un plan perpendiculaire à l'axe, la vitesse du rayon extraordinaire ne change point avec l'obliquité, et la différence des chemins parcourus reste proportionnelle à la longueur du trajet dans l'intérieur de la lame. Il en résulte donc exactement le même effet que si la lame devenait plus épaisse, sans cesser d'être perpendiculaire au faisceau. Par conséquent les couleurs montent à des ordres successivement plus élevés; elles passent, par exemple, du troisième ordre au quatrième, au cinquième, etc.

2°. Quand on fait tourner la lame autour de la ligne mn' , perpendiculaire à l'axe, la réfraction s'accomplit dans la section principale, et il se développe deux causes qui agissent en sens contraire: d'une part, la vitesse extraordinaire change avec l'obliquité; elle augmente dans les cristaux positifs, elle diminue dans les cristaux négatifs, et dans les deux cas elle se rapproche de la vitesse ordinaire. Ainsi, par cette cause, la différence des chemins parcourus devient de plus en plus petite à mesure que l'inclinaison devient plus grande. C'est comme si la lame devenait plus mince. D'une autre part la longueur du trajet des rayons dans l'intérieur du cristal devient croissante avec l'inclinaison; et cette cause augmente de plus en plus la différence des chemins parcourus; c'est comme si la lame devenait plus épaisse; on pourrait concevoir une substance cristallisée, telle que ces deux

causes contraires se fissent une exacte compensation, et alors les teintes des images resteraient invariables sous toutes les obliquités, lorsqu'on inclinerait les lames, en les faisant tourner autour de la perpendiculaire à l'axe. Dans le cristal de roche, la première cause l'emporte, et en dernier résultat, les couleurs changent, comme si les lames devenaient plus minces. Par conséquent les couleurs descendent à des ordres moins élevés: elles passent par exemple du troisième ordre au deuxième ordre ou au premier ordre.

Il est facile de voir que les effets se compliquent suivant certaines lois, lorsque, pour incliner les lames, on les fait tourner autour d'une ligne qui n'est ni parallèle ni perpendiculaire à l'axe.

Tous ces phénomènes peuvent être observés avec beaucoup de netteté et d'éclat sur une espèce de mica qui se trouve dans les laves du Vésuve. Son tissu feuilleté donne naturellement des lames que l'on peut amincir à volonté avec la pointe d'un canif ou d'une lancette. Chacune de ces petites lames est un cristal à un axe, et c'est une chose digne de remarque que cet axe soit perpendiculaire aux deux faces de la lame. Sous l'incidence perpendiculaire, il n'y a donc aucune coloration, puisque les deux rayons ordinaire et extraordinaire se meuvent alors dans le sens de l'axe. Mais en inclinant les lames dans un sens quelconque, on les incline toujours dans la section principale, et les effets que l'on obtient sont toujours les mêmes que si l'on augmentait l'épaisseur.

Le beryl est aussi un cristal à un axe que l'on peut employer à ces expériences.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que l'on obtient des teintes plus variées et encore plus complexes lorsqu'on fait passer le rayon polarisé au travers de deux lames différentes, soit que ces lames aient été simplement superposées, soit qu'elles aient été ajustées chacune sur l'un des supports de l'appareil (Fig. 747 et 748); dans ce dernier cas, l'une d'elles peut prendre à l'égard de l'autre toutes les positions possibles.

La duplication des lames donne un moyen de développer des couleurs dans les cristaux où l'on ne pourrait en découvrir aucune par l'observation directe. En effet, prenons pour exemple une lame de quartz parallèle à l'axe, ayant plusieurs millimètres ou même plusieurs centimètres d'épaisseur, et donnant par conséquent des images parfaitement blanches, il y aura deux manières de rendre ces images colorées comme celles des lames dont l'épaisseur est moindre qu'un demi-millimètre: on y parviendra par la duplication parallèle ou par la duplication croisée.

1°. *Duplication parallèle.* On prend un cristal négatif, par exemple le spath d'Irlande; on en taille une lame parallèle à l'axe, et d'une épaisseur telle que la différence des chemins parcourus par les rayons ordinaire et extraordinaire soit un peu moindre ou un peu plus grande que la même diffé-

rence dans la lame de quartz; on superpose ces deux lames en rendant leurs sections principales parallèles entre elles, et leur système se comporte comme une seule lame mince de quartz ou de spath d'Islande. La raison en est évidente: dans le quartz, le rayon extraordinaire perd de la vitesse sur le rayon ordinaire: il en gagne dans le spath d'Islande. Ainsi, en définitive, la différence des chemins parcourus dans les deux lames superposées n'est que l'excès de la différence des chemins de l'une sur la différence des chemins de l'autre. Le résultat peut donc être calculé d'avance par les formules précédentes.

2°. *Duplication croisée.* On prend un cristal positif, comme le quartz; on en taille une lame parallèle à l'axe, et d'une épaisseur telle que la différence des chemins parcourus par les rayons ordinaire et extraordinaire soit un peu moindre ou un peu plus grande que la même différence dans la lame de quartz; on superpose ces deux lames en rendant leurs sections principales perpendiculaires entre elles, et leur système se comporte comme une seule lame mince. La raison en est évidente: le rayon extraordinaire, qui a perdu de la vitesse dans la première lame, devient rayon ordinaire dans la seconde, et regagne de la vitesse, et vice versa; ainsi, en définitive, la différence des chemins parcourus dans les deux lames croisées n'est que l'excès de la différence des chemins de l'une sur la différence des chemins de l'autre; et si les deux lames sont de même substance, leur système produit exactement le même effet qu'une seule lame égale à la différence de leur épaisseur.

C'est pour plus de simplicité que nous avons supposé les lames parallèles à l'axe.

De ces phénomènes se déduit le plus simple des procédés que l'on puisse employer pour reconnaître si un cristal donné est positif ou négatif. Car il suffit d'en tailler une lame à faces parallèles et assez épaisse pour ne pas donner de couleurs, puis de la doubler avec une lame épaisse d'un cristal connu, du quartz, par exemple. Si les couleurs naissent par la *duplication parallèle*, le cristal sera de signe contraire au quartz, et par conséquent négatif; si elles naissent par la *duplication croisée*, le cristal donné sera de même signe que le quartz, et par conséquent positif. On voit qu'il faudra seulement connaître les sections principales du cristal donné et de celui qui sert à le doubler: il n'est pas nécessaire que les faces soient parallèles à l'axe.

626. *Cristaux à deux axes.* — Les cristaux à deux axes qui se prêtent le plus facilement aux expériences qui nous occupent sont le mica et la chaux sulfatée, à cause de la propriété qu'ils ont de se séparer naturellement en lames de plus en plus minces.

Les petits feuillets de chaux sulfatée peuvent sans peine se briser suivant leurs joints naturels; ils donnent ainsi des parallélogrammes aux côtés desquels nous rapporterons les directions des axes.

M. Haüy prend pour forme primitive de cette substance un de ces parallélogrammes dont les côtés sont entre eux comme 13 est à 12. Si l'on triple le côté 12, en laissant à l'autre sa valeur, on formera un nouveau parallélogramme dont la grande diagonale marque précisément la direction de la *ligne intermédiaire*; les axes, symétriquement placés de part et d'autre de cette ligne, font avec elle des angles de 30° , et par conséquent l'angle qu'ils font entre eux est de 60° . D'après cela, une lame de chaux sulfatée étant donnée, il sera facile de trouver sa *section principale*, puisqu'il suffira de tracer la ligne intermédiaire et de concevoir par cette ligne une section perpendiculaire aux faces de la lame.

Pour étudier maintenant les couleurs données par la chaux sulfatée, on disposera les lames sur les supports x et x' de l'appareil (Fig. 747), comme pour les cristaux à un axe, puis l'on observera avec le prisme bi-réfringent les apparences que présente le faisceau transmis. Les couleurs auront un vif éclat quand les lames seront très minces; et il sera facile de se convaincre que, sous l'incidence perpendiculaire, tous les phénomènes se produisent autour de la ligne intermédiaire dans ce cristal, suivant les mêmes lois qu'autour de l'axe dans les cristaux à un axe; et, par une rencontre assez remarquable, des épaisseurs égales de quartz et de chaux sulfatée donnent précisément les mêmes nuances.

La forme primitive du mica de Sibérie est un prisme droit à base rhomboïde, perpendiculaire au plan des lames. L'axe du prisme est la *ligne intermédiaire*, et les axes optiques symétriquement placés par rapport à cette ligne font avec elle des angles de $20^\circ 21'$, leur plan passant par l'une des diagonales du rhombe. Cette disposition est, comme on voit, très différente de celle de la chaux sulfatée. Cependant, sous l'incidence perpendiculaire, les lames de mica de Sibérie suivent encore les mêmes lois que les lames des cristaux à un axe: seulement la diagonale du rhombe qui détermine le plan des axes est la ligne qui remplace l'axe unique. Quant à l'épaisseur absolue qui détermine une teinte donnée, M. Biot l'a trouvée plus grande que dans la chaux sulfatée dans le rapport de 696 à 365.

En examinant les phénomènes que produisent les lames des cristaux à deux axes lorsqu'elles reçoivent le rayon sous diverses obliquités, on peut en déduire des procédés pour déterminer les axes eux-mêmes; mais nous indiquerons dans l'article suivant un moyen plus simple et plus direct. Nous ajouterons toutefois que, pour observer ces phénomènes, il suffit de disposer horizontalement, sur un fond noir, des lames minces de mica ou de chaux sulfatée de manière qu'elles reçoivent la lumière des lames; alors, en les regardant avec une tourmaline sous l'angle de polarisation, on aperçoit à leur seconde surface des teintes uniformes

très éclatantes. C'est une belle expérience que l'on ne voit pas sans intérêt.

Anneaux colorés des lames cristallisées.

627. *Cristaux à un axe.* — Nous examinerons d'abord, dans les cristaux à un axe, les anneaux colorés singuliers que peuvent développer tous les cristaux doués de la double réfraction; et nous prendrons pour exemple le spath d'Islande, qui donne des couleurs très régulières.

Voici les conditions générales du phénomène. Un faisceau de lumière blanche polarisée traverse perpendiculairement une lame perpendiculaire à l'axe; après son émergence, on le regarde avec une plaque de tourmaline, et l'on aperçoit une série d'anneaux ronds concentriques et très vivement colorés. La figure 751 représente la disposition de l'expérience.

a est le réflecteur sur lequel le faisceau se polarise par réflexion. C'est une grande plaque de verre de 8 à 9 ponce de diamètre, ou simplement un disque de bois bien poli et revêtu d'un vernis brillant, comme le bois d'une table ou d'un meuble.

r' est la plaque perpendiculaire à l'axe; il est bon de la tenir à quelques pouces de l'œil.

r est la plaque de tourmaline que nous supposons collée sur une lame de verre parallèle v .

Le phénomène change d'aspect avec la position de la tourmaline. La figure 752 représente la série des anneaux quand l'axe de la tourmaline est dans le plan primitif de polarisation. Ils sont alors traversés par une belle *croix noire*, qui étend ses deux branches à une grande distance. La figure 753 suppose au contraire que l'axe de la tourmaline est perpendiculaire au plan primitif de polarisation; la *croix noire* est alors remplacée par une *croix blanche*, et dans tous ses points la nouvelle image est complémentaire de la première.

En faisant tourner lentement la tourmaline pour la faire passer de la première position à la seconde, on peut suivre de l'œil les nuances par lesquelles se transforment les couleurs.

Pour étudier les lois auxquelles ces anneaux se trouvent soumis, il suffit d'opérer avec de la lumière simple en plaçant un verre rouge, par exemple, sur le trajet du faisceau polarisé, et de mesurer ensuite la distance de l'œil, l'épaisseur de la lame cristallisée et les diamètres des anneaux. On arrive ainsi à ces deux lois générales.

1^o Dans une même lame, les carrés des diamètres des anneaux des divers ordres suivent la série des nombres 0, 1, 2, 3, 4, etc.;

2^o Dans des lames de différentes épaisseurs, les carrés des diamètres des anneaux du même ordre sont en raison inverse des racines carrées des épaisseurs des lames.

Quant à l'épaisseur absolue que devrait avoir une lame d'une substance donnée pour produire des anneaux d'une grandeur déterminée, nous de-

vous nous contenter de dire ici d'une manière générale qu'elle dépend du rapport des vitesses ordinaire et extraordinaire de la lumière dans l'intérieur du cristal. La cause de cette dépendance paraît évidente par ce que nous allons indiquer sur la cause elle-même du phénomène.

Soit r' (Fig. 754) la plaque perpendiculaire à l'axe, et n la position de l'œil. La partie du faisceau incident qui devient visible forme une espèce de rôté lumineux oxr' , dont le sommet o est dans l'œil, dont la base circulaire an a un diamètre ax' variable avec la distance, et dont l'axe co coïncide avec l'axe du cristal. Les divers rayons de ce cône éprouvent des effets bien différents : ceux qui avoisinent l'axe co traversent la plaque sans se dévier, et ceux qui se trouvent près des bords an la traversent obliquement, et sont par conséquent soumis aux deux réfractions ordinaire et extraordinaire; mais ces deux réfractions s'accomplissent toujours dans le même plan, parce que toute section perpendiculaire passant par co est une section principale. De plus, les divers rayons, également éloignés de l'axe ou répartis sur une même circonférence, éprouvent des modifications bien différentes dans leurs plans de polarisation; car, si l'on représente par na $b'n'$ (Fig. 755) la coupe du faisceau au moment où il sort de la plaque cristallisée, et par ax' le plan primitif de polarisation, il est évident, 1^o que les rayons a et a' restent polarisés dans le plan primitif, puisque leur plan de polarisation coïncide avec la section principale ax' , qu'ils traversent; 2^o que les rayons b et b' restent pareillement polarisés dans leur plan primitif, parce que leur plan de polarisation est perpendiculaire à la section na , qu'ils traversent; 3^o que les rayons tels que r se séparent en deux autres, l'un ordinaire, polarisé suivant $r'n$, l'autre extraordinaire, polarisé suivant $r'x$; car la section principale $r'r'$ qu'ils traversent n'est ni parallèle ni perpendiculaire du plan $r'n$ ou $r'x$ de la polarisation primitive. Or ces derniers rayons, en se séparant ainsi, prennent nécessairement des vitesses différentes; l'ordinaire prend de l'avance sur l'extraordinaire, ou vice versa, suivant que le cristal est positif ou négatif; et en s'éloignant progressivement de l'axe c , on voit que cette avance devient successivement égale à un nombre pair ou à un nombre impair de demi-ondulations; maintenant, lorsqu'on va regarder, avec la tourmaline, un faisceau modifié de la sorte, il est facile de voir qu'il en doit résulter des anneaux et une croix noire ou une croix blanche, suivant que la section principale de la tourmaline est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif ax' de polarisation. Pour déterminer d'avance l'ordre des teintes et la grandeur absolue des anneaux, il suffit de connaître la position de l'œil, l'épaisseur de la plaque, et les vitesses ordinaire et extraordinaire correspondant à chaque espèce de lumière simple.

Les plaques de spath d'Islande de quelques

millimètres d'épaisseur, ou même de 2 ou 3 centimètres, donnent des anneaux assez réguliers.

Cependant cette substance elle-même et les autres cristallins à un axe présentent en général divers accidens sur lesquels M. Herschell a fait des observations intéressantes. Quelquefois les anneaux sont plus ou moins ovales, et, en tournant la plaque dans son plan, on voit la croix noire se briser suivant des courbes plus ou moins contournées. C'est une marque certaine que la cristallisation n'est pas parfaitement régulière. Le quartz, le beryl, offrent des accidens analogues, plus fréquens encore et plus variés.

Mais, de toutes les modifications que peut éprouver le phénomène des anneaux, l'une des plus frappantes, et certainement la plus intéressante à étudier, est celle qui se manifeste souvent dans l'hyposulfate de chaux et dans certains échantillons d'apophyllite, particulièrement dans ceux qui viennent de Cipit dans le Tyrol. Ces substances donnent des anneaux tout autrement usucés que ceux des autres cristallins à un axe. Dans l'apophyllite, par exemple, ils sont presque exactement noirs et blancs. Cela tient évidemment à ce que, dans ces substances, les vitesses ordinaires et extraordinaires varient suivant des lois particulières pour chaque espèce d'ondulation.

Les anneaux colorés dont nous venons de parler peuvent être produits d'une infinité de manières; car il suffit d'avoir un faisceau polarisé, soit naturellement, comme la lumière du ciel, soit artificiellement par la réflexion ou par la réfraction; de le faire passer au travers d'un cristal à un axe, de manière que le rayon central suive l'axe, et enfin de l'observer en le polarisant de nouveau, soit par réflexion, soit par réfraction. Cependant le plus commode des appareils pour ce genre d'observation est celui de M. Herschell, qui est représenté dans la figure 756.

c et c' sont deux tubes de cuivre d'une petite longueur, engagés l'un dans l'autre de manière que le second tourne aisément dans le premier. r et r' sont deux plaques de tourmaline, qui peuvent, par le mouvement des tubes auxquels elles sont fixées, avoir leurs axes parallèles ou croisés.

rr' est la lame cristallisée, perpendiculaire à l'axe; au moyen d'un petit bouton a et d'une fente correspondante dans le tube c, elle peut tourner dans son plan.

Enfin v v' est tour à tour un verre dépoli ou une lentille d'un court foyer.

Avec le verre dépoli on regarde en r, et l'on reçoit les anneaux dans l'œil, soit que l'on se serve de la lumière solaire ou de la lumière des bougies; le verre sert à disperser la lumière, et la première tourmaline à la polariser.

Avec la lentille, on expose l'appareil dans la chambre noire à un faisceau de lumière solaire, qui est d'abord concentré en r', on a peu près, et qui, traversant ensuite la plaque rr' et la tourma-

line r, va peindre sur un tableau blanc le système complet des anneaux.

Si, au lieu d'une seule lame perpendiculaire à l'axe, on en place deux de mêmes substances ou de substances différentes, les phénomènes se compliquent et présentent de singulières apparences, dont on peut se rendre compte avec un peu d'attention. Il en est de même encore si l'une des lames est inclinée à l'axe d'une manière quelconque.

Il est facile de voir comment on peut parvenir, par l'observation des anneaux, et déterminer avec précision la direction de l'axe dans les cristallins à un axe.

628. *Cristaux à deux axes.* — Pour analyser le phénomène des anneaux colorés dans les cristallins à deux axes, nous prendrons d'abord pour exemple le nître ou nître de potasse. Les cristallins de cette substance sont ordinairement des prismes à six pans, dont la section perpendiculaire aux arêtes forme un hexagone régulier. Supposons que par des moyens convenables l'on ait préparé une lame de nître perpendiculaire à la ligne du prisme, ayant environ 1 ou 2 millimètres d'épaisseur; les deux axes optiques de cette lame sont dans un plan perpendiculaire à ses faces, et se trouvent symétriquement placés par rapport à l'axe de cristallisation, leur inclinaison sur cet axe étant de 3° environ, et leur inclinaison mutuelle à peu près de 6°. Après avoir disposé cette lame entre les deux tourmalines croisées dans l'appareil de M. Herschell (Fig. 756), pour la regarder directement à la lumière diffuse, on observe de brillantes couleurs régulièrement arrangées, telles qu'elles sont représentées dans la figure 757. C'est un double système d'anneaux elliptiques ou plutôt ovales. Chaque système a son centre, l'un en c, l'autre en c', et leur distance paraît soustendre à l'œil un angle de 6°; il y a aussi deux bandes noires rectangulaires, dont l'une passe par les centres.

Les tourmalines restant immobiles, si l'on fait tourner la lame de nître sur son plan, on voit les lignes noires se briser, se déformer, et prendre successivement les positions indiquées dans les figures 758, 759 et 760. La figure 758 est l'apparence du phénomène au moment où la rotation commence.

La fig. 759 correspond à une rotation de 22° 30', et la fig. 760 à une rotation de 45°.

Les mêmes successions se reproduisent dans chaque quadrans. Ces phénomènes peuvent être étudiés plus commodément encore dans la chambre noire, au moyen de la lumière solaire. Pour cela il faut mettre en place la lentille v v' (Fig. 755), et disposer un tableau à une distance convenable de r' pour recevoir l'image. On peut ainsi dessiner les lignes d'égal teinte ou les *lignes isochromatiques*, et M. Herschell, qui a fait le premier ces expériences, s'est assuré qu'elles forment des courbes bien connues des géomètres sous le nom de *lemniscote*. Les apparences variées de cette courbe sont repré-

sentées dans la fig. 761. Sa propriété caractéristique est que le produit des deux distances ca et ca' , d'un point quelconque aux deux centres, est constant pour une même courbe, et égal au produit de la demi-distance des centres par une quantité connue, qui varie en passant d'une courbe à l'autre.

Le double système d'anneaux est produit par les deux axes, et le centre de chaque système indique le prolongement de l'axe autour duquel il se produit. Il en résulte donc, et un caractère facile pour distinguer les cristaux à deux axes des cristaux à un axe, et un moyen sûr pour déterminer la direction absolue des axes et l'angle qu'ils font entre eux. Il faut seulement varier les coupes, suivant lesquelles on fait tailler les lames, jusqu'à ce qu'on arrive à la production des anneaux : les indications minéralogiques peuvent limiter beaucoup les tâtonnements inutiles. On conçoit cependant que si les axes faisaient entre eux des angles un peu grands, il deviendrait impossible d'embrasser à la fois dans le même champ les deux systèmes d'anneaux. C'est ce qui arrive en effet. Et pour donner un exemple de l'apparence que prend alors le phénomène, nous choisirons le mica, dont les deux axes sont aussi dans un plan perpendiculaire aux lames. Dans cette substance, l'angle des axes varie, suivant les échantillons, depuis 14° à 45° , et même pour les angles minimums, l'on ne peut voir à la fois que les anneaux correspondants à l'un des axes. On peut alors procéder de la manière suivante : après avoir choisi une lame de mica d'environ 1 millimètre d'épaisseur, on distinguera facilement les deux sections rectangulaires dans lesquelles la lumière polarisée passe sans changer son plan de polarisation ; l'une de ces sections est la section principale contenant les deux axes. Pour la reconnaître, on présente la lame perpendiculairement à un faisceau polarisé, de manière que le plan de polarisation fasse un angle de 45° avec les deux sections précédentes, et dans cette position on l'incline successivement autour de chacune de ces sections ; il s'en trouvera une pour laquelle l'inclinaison fera paraître les anneaux et la tache centrale ; on sera sûr alors que le rayon se transmet suivant l'un des axes ; ensuite, en inclinant on sens contraire, de manière que le même section soit toujours dans le plan d'incidence, on trouvera une nouvelle position qui fera paraître les anneaux, et qui indiquera par conséquent la direction du second axe.

Vus isolément dans le mica, les deux systèmes d'anneaux ont le même aspect que quand ils sont vus simultanément dans le nitrate de potasse.

Si, pour toutes les couleurs du spectre, les axes optiques conservaient exactement la même direction, et si en outre les vitesses restaient proportionnelles aux longueurs des ondulations, il serait facile de calculer dans tous les cas les nuances des

anneaux des divers ordres. Mais nous avons déjà vu que dans certains cristaux à un axe les vitesses changent suivant des lois particulières ; il en est de même dans les cristaux à deux axes, et l'on observe de plus ce fait très remarquable : c'est que dans un grand nombre de cas les couleurs diversement réfringibles ont leurs axes optiques dans des directions très sensiblement différentes. Nous prendrons pour exemple le tartrate de soude et de potasse ; lorsqu'on taille une lame de cette substance à peu près perpendiculairement à l'un des axes, et qu'on l'expose ensuite à un trait solaire entre les deux tourmalines croisées dans l'appareil de la figure 756, pour l'éclairer successivement par les diverses couleurs du spectre, on voit les anneaux se déplacer sur le tableau sans se déformer ; le centre, qui appartient à la lumière rouge, est très sensiblement différent de celui qui appartient à la lumière violette. La même chose aurait lieu pour le système d'anneaux correspondant à l'autre axe ; et M. Herschell, à qui l'on doit la connaissance de ce phénomène important, paraît avoir constaté par de nombreuses expériences que les systèmes d'axes correspondants aux diverses couleurs sont tous contenus dans le même plan.

D'après cela, quand on dit d'un cristal qu'il est à deux axes, cela signifie en réalité qu'il a un système de deux axes pour chacune des couleurs simples, et que l'angle de ce système change avec la réfringibilité.

Polarisation circulaire.

629. Fresnel a donné le nom de *polarisation circulaire* à un phénomène remarquable qui avait été observé d'abord par M. Arago, dans des plaques de cristal de roche taillées perpendiculairement à l'axe, et qui a été observé ensuite par M. Biot dans les liquides et même dans les vapeurs.

Nous commencerons par exposer ce phénomène dans toute sa simplicité, et après cela nous essaierons d'indiquer, autant qu'il est possible dans cet ouvrage, l'ingénieuse explication que Fresnel en a donnée.

Lorsqu'un faisceau de lumière homogène polarisée traverse perpendiculairement une plaque de cristal de roche perpendiculaire à l'axe, il reste encore polarisé après son émergence ; mais son plan de polarisation est changé : les plaques tirées de certains échantillons le font tourner de *droite à gauche*, et celles qui proviennent d'autres échantillons le font au contraire tourner de *gauche à droite* par rapport au plan primitif de polarisation.

L'appareil de la fig. 747 est très commode pour constater ce fait par l'expérience. On dispose la plaque de cristal de roche sur l'un des supports x ou x' , de manière que le faisceau polarisé la rencontre perpendiculairement ; on fait tomber sur le réflecteur successivement toutes les couleurs du spectre, et l'on observe le faisceau transmis se moyen du prisme bi-réfringent ou de la tourmaline,

pour constater la direction de son plan de polarisation.

En opérant de la sorte sur des plaques de diverses épaisseurs tirées d'un même échantillon, et en répétant les expériences sur des plaques tirées de différents échantillons, on arrive aux résultats suivants :

1° Pour toutes les plaques tirées d'un même cristal, la rotation du plan de polarisation est proportionnelle à l'épaisseur.

Ainsi une plaque pourrait être assez épaisse pour que la rotation fût d'une ou de plusieurs demi-circonférences; ce qui ramènerait le nouveau plan de polarisation en coïncidence parfaite avec le plan primitif;

2° Dans la variété de quarts appelée *plagioclase* (Haüy), le sens des inclinaisons des facettes détermine toujours le sens de la rotation du plan de polarisation.

C'est à M. Herschell que l'on doit cette remarque curieuse, qui établit une liaison nouvelle entre les propriétés optiques des cristaux et l'état d'aggrégation de leurs molécules;

3° Soit qu'un cristal tourne de gauche à droite, soit qu'il tourne de droite à gauche, la même épaisseur imprime toujours à très peu près la même rotation;

4° En superposant deux plaques qui agissent en sens contraire, l'effet qu'elles produisent est à peu près égal à celui que produirait une seule plaque, ayant une épaisseur égale à leur différence et agissant comme la plus épaisse;

5° Les diverses couleurs du spectre éprouvent dans leur plan de polarisation des rotations d'autant plus grandes, qu'elles sont plus réfringibles. En prenant pour type la rotation produite par une plaque de cristal de roche de 1 millimètre d'épaisseur, M. Biot est parvenu aux résultats suivants pour les diverses couleurs simples.

Désignation du rayon simple.	Arc de rotation en degrés orangé-rouge.
Rouge extrême.	17° — 29' — 47''
Limite du rouge et de l'orangé.	20 — 28 — 47
de l'orangé et du jaune.	22 — 18 — 49
du jaune et du vert.	25 — 40 — 31
du vert et du bleu.	30 — 2 — 45
du bleu et de l'indigo.	34 — 34 — 18
de l'indigo et du violet.	37 — 51 — 58
Violet extrême.	44 — 4 — 58

Tous les rayons diversement réfringibles ayant ainsi des plans de polarisation différents, on conçoit qu'un faisceau blanc polarisé qui tombe sur une plaque de cristal de roche, doit offrir, après son émergence, des couleurs plus ou moins vives, lorsqu'on viendra le regarder au moyen du prisme bi-réfringent ou de la tourmaline. La composition de ses teintes pourra facilement se déduire des données précédentes; M. Biot en a fait la vérification par un grand nombre d'expériences.

M. Brewster a reconnu que les couches succes-

sives qui composent certains échantillons d'améthyste sont douées de propriétés contraires, et qu'elles font alternativement tourner le plan de polarisation dans un sens ou dans l'autre. De là résulte une série de franges composées et enlucées de mille manières, lorsqu'on fait passer un faisceau blanc polarisé au travers d'une plaque d'améthyste convenablement taillée.

630. *Mouvement du plan de polarisation dans les corps non cristallins.* — Le quartz est, parmi les substances solides, la seule jusqu'à présent connue qui fasse tourner les plans de polarisation sous les conditions que nous avons indiquées; mais on a découvert des liquides et même des gaz qui jouissent de cette propriété; c'est à M. Biot et Seebeck que l'on doit cette découverte, et l'on doit particulièrement à M. Biot, un grand nombre de recherches intéressantes sur ce sujet. Les liquides dans lesquels cet habile physicien a découvert et étudié les phénomènes dont il s'agit, sont : les huiles essentielles de térébenthine et de citron, qui font tourner la première de droite à gauche, la seconde de gauche à droite; la dissolution de camphre dans l'alcool, le sirop de sucre concentré, etc. On retrouve dans toutes ces substances exactement les mêmes phénomènes que dans le cristal de roche : ils ne diffèrent que par l'intensité. Voici le tableau des résultats comparatifs, tel qu'il a été donné par M. Biot pour une même espèce de lumière rouge, les plaques étant toutes réduites par le calcul à l'épaisseur de 1 millimètre.

De droite à gauche.

Cristal de roche.	18° 24' 50''
Huile essentielle de térébenthine.	0 16 16
Id. autre espèce.	0 15 4
Id. purifiée.	0 17 10
Solution { Camphre artificiel 1753 }	0 1 8
{ Alcool . . . 17359 }	
Huile essentielle de laurier.	0 " " "

De gauche à droite.

Cristal de roche.	18 24 80
Huile essentielle de citron.	0 26 10
Sirop de sucre concentré.	0 33 14

Il paraît que ces rapports restent sensiblement les mêmes pour les différentes couleurs; de telle sorte qu'un rayon polarisé blanc donne à peu près les mêmes successions de teintes en traversant toutes ces substances.

L'appareil dont on se sert pour ces sortes de recherches consiste en un tube métallique d'une longueur suffisante, terminé aux deux bouts par des lames de verres parallèles. Ce tube étant rempli du liquide que l'on veut éprouver, on le fait traverser suivant son axe par un faisceau de lumière polarisée, que l'on analyse après son émergence au moyen du prisme bi-réfringent.

Lorsqu'on altère la pureté de l'un de ces liquides, soit en y mêlant un liquide sans action ou un li-

quide actif de même signe ou de signe contraire, l'effet total est toujours égal à la somme ou à la différence des actions particulières qui seraient produites séparément par les molécules de chaque espèce. Cette loi se soutient encore lorsque les molécules sont soumises à des actions chimiques, et elle se soutient même lorsque les liquides actifs passent à l'état de vapeur, comme M. Biot l'a constaté, en opérant dans de longs tuyaux sur de la vapeur d'essence de térébenthine. On est ainsi conduit à cette conséquence remarquable, que l'action dont il s'agit est inhérente aux molécules des corps, en ce qu'elles impriment des modifications particulières aux molécules d'éther qui les environnent.

631. *Notions fondamentales sur la théorie de la polarisation circulaire.* — Fresnel suppose que les vibrations lumineuses s'exécutent dans le sens même de la surface des ondes, perpendiculairement à la direction des rayons, et qu'un faisceau polarisé est celui pour lequel ces vibrations ont toujours la même direction, son plan de polarisation étant le plan auquel ces petits mouvements oscillatoires des molécules étheriques restent constamment perpendiculaires : or, il suit de là que, si deux systèmes d'ondes d'égale intensité et polarisés rectangulairement, c'est-à-dire dont les mouvements oscillatoires sont perpendiculaires entre eux, diffèrent dans leur marche d'un quart d'ondulation, le mouvement composé qu'ils imprimeront à chaque molécule, au lieu d'être rectiligne comme dans les deux faisceaux considérés séparément, sera circulaire et s'exécutera avec une vitesse uniforme : les molécules tourneront de droite à gauche lorsque le système d'ondes en avant aura son plan de polarisation à droite de celui du système d'ondes en arrière d'un quart d'ondulation, et elles tourneront de gauche à droite lorsque le premier plan sera à gauche du second, ou lorsque les plans de polarisation restent disposés comme dans le premier cas, la différence de marche sera égale à trois quarts d'ondulation. Si la différence de marche, au lieu d'être un nombre pair ou impair de quarts d'ondulation, était un nombre fractionnaire, les mouvements vibratoires ne seraient ni rectilignes ni circulaires, mais elliptiques.

On conçoit que, dans cette rotation générale des molécules autour de leurs positions d'équilibre, elles n'occupent pas au même instant les mêmes points des circonférences qu'elles décrivent, vu le mouvement progressif des ondes. Pour se représenter leurs positions relatives, il faut concevoir que celles qui étaient sur une même droite parallèle au rayon, dans l'état d'équilibre, se trouvent maintenant placées sur une hélice très étroite, décrite autour de cette ligne droite comme axe, et dont le pas est égal à la longueur d'une ondulation. Si l'on fait tourner maintenant cette hélice autour de son axe d'un mouvement uniforme, de manière qu'elle décrive une circonférence dans l'intervalle de temps

pendant lequel s'accomplit une ondulation lumineuse, et que l'on conçoive d'ailleurs que, dans chaque tranche infiniment mince perpendiculaire au rayon, toutes les molécules exécutent les mêmes mouvements et conservent les mêmes situations respectives, on aura une idée exacte du genre de vibrations qui constitue la polarisation circulaire.

Mais il résulte aussi de la théorie mécanique des interférences, qu'un système d'ondes polarisé rectilignement peut être remplacé par deux autres systèmes polarisés à angle droit entre eux et coïncidant dans leur marche. De plus, chacun de ceux-ci peut être remplacé par deux autres systèmes polarisés dans le même plan, ayant sur lui, l'un une avance d'un huitième, et l'autre un retard d'un huitième d'ondulation, et par conséquent séparés entre eux par un quart d'ondulation ; ce qui donne quatre systèmes d'ondes d'égale intensité, dont deux, polarisés à angle droit, sont en arrière d'un quart d'ondulation des deux autres, polarisés aussi à angle droit. Si maintenant l'on prend ces systèmes pour les combiner en croix, c'est-à-dire chacun de ceux qui est en arrière avec celui qui est en avant, et polarisé à angle droit avec lui, on voit que l'on aura précisément deux faisceaux égaux, d'accord entre eux, et polarisés circulairement, l'un de droite à gauche, et l'autre de gauche à droite.

Donc, en définitive, tout faisceau d'une intensité égale à 1 et polarisé rectilignement, peut toujours être remplacé par deux faisceaux polarisés circulairement d'accord entre eux, ayant chacun une intensité $1/2$, et tournant l'un de gauche à droite, et l'autre de droite à gauche. Réciproquement, un système de deux faisceaux polarisés circulairement reproduit toujours un faisceau polarisé rectilignement dans un plan unique ; mais avec cette condition indiquée par la théorie, que, si les deux faisceaux polarisés circulairement acquièrent dans leur trajet quelque différence de marche, le plan de polarisation du faisceau polarisé rectilignement qui peut les remplacer aura tourné de droite à gauche ou de gauche à droite, d'un angle proportionnel à la différence de marche. La rotation aura lieu de droite à gauche ou de gauche à droite, suivant que le faisceau polarisé circulairement de gauche à droite aura gagné de l'avance ou éprouvé du retard.

Il est évident, d'après ces notions, que, s'il se rencontre dans la nature quelque substance qui jouisse de la singulière propriété de transmettre, avec des vitesses différentes, les faisceaux polarisés circulairement de droite à gauche et ceux qui sont polarisés de gauche à droite, tout faisceau polarisé rectilignement devra, en traversant ces substances, éprouver un mouvement de rotation dans son plan de polarisation ; ce mouvement s'accomplira dans un sens ou dans l'autre, suivant que l'un des systèmes aura gagné de l'avance ou éprouvé du retard ; il sera proportionnel à l'épaisseur de la substance traversée ; et enfin il dépendra, suivant certaines lois, de la longueur des ondulations de la lumière.

Telle est l'explication donnée par Fresnel des phénomènes que présentent le quartz et les autres substances dont nous avons parlé. Pour en saisir la clef, tout se résume, comme on voit, à bien comprendre qu'un faisceau polarisé rectilignement peut être remplacé par un système de deux faisceaux polarisés circulairement en sens contraire, et à admettre que, de ces deux systèmes, l'un va plus vite que l'autre lorsqu'ils traversent certains corps.

Ce second point pouvait paraître tout-à-fait hypothétique; aussi Fresnel a-t-il mis tous ses soins à le démontrer d'une manière directe, et il y est parvenu par une expérience décisive dont nous allons rendre compte.

632. *Double réfraction du cristal de roche dans le sens de son axe.* — Le prisme ou le cylindre $abcd$ (Fig. 762), est composé de trois prismes de cristal de roche travaillés séparément, et ensuite ajustés avec beaucoup de soin. Celui du milieu ass a son angle au sommet s de 152° ; il est tiré d'une aiguille de quartz qui fait, par exemple, tourner le plan de droite à gauche; et ses deux faces latérales as et sa sont également inclinées sur l'axe. Les deux extrêmes cas et cas sont tirés d'une aiguille de quartz qui fait tourner en sens contraire, c'est-à-dire de gauche à droite; ils ont leurs faces ap et ca exactement perpendiculaires à l'axe, et leurs faces as et sa convenablement inclinées pour que les axes optiques des trois prismes se trouvent dans la même direction. Maintenant, si l'on fait passer dans cette direction un rayon polarisé, on reconnaît qu'il se divise en deux, et donne, après son émergence, deux rayons divergens. Donc le cristal de roche exerce une double réfraction dans le sens de son axe, et cette double réfraction ne ressemble en rien à celle qui se fait à l'ordinaire dans le quartz et dans les autres cristaux; car les deux faisceaux émergents ne donnent ni l'un ni l'autre aucune trace apparente de polarisation: du moins chacun d'eux donne toujours deux images blanches et également intenses, lorsqu'on les analyse avec le prisme biréfringent. Ce phénomène remarquable est la preuve directe que les faisceaux polarisés circulairement en sens contraire ne se propagent pas avec la même vitesse en suivant l'axe du cristal de roche, et que celui des deux qui va le plus vite dans les deux prismes extrêmes va le plus lentement dans le prisme du milieu. En effet, considérons le faisceau polarisé qui se présente en ab comme composé de deux faisceaux polarisés circulairement en sens contraire et d'accord entre eux. S'ils prennent des vitesses différentes en traversant le prisme ass , ils éprouveront des réfractions différentes au passage de ass dans asa , et d'autant plus différentes qu'ils doivent ici changer de rôle, le plus lent devenant le plus rapide, et *vice versa*. Les voilà donc divisés dans tout le trajet de ass , et au passage de ce prisme dans le dernier cas , ils se divisent encore davantage, puisque le plus rapide redevient

le plus lent, et *vice versa*. Les deux faisceaux émergents ne sont donc autre chose que les deux faisceaux polarisés circulairement en sens contraire qui composent le faisceau polarisé incident, et qui ont été séparés par l'inégale vitesse qu'ils ont dû prendre dans les prismes opposés de quartz. Nous allons en trouver une nouvelle preuve dans une autre expérience que l'on doit encore à l'indépuisable sagacité de Fresnel.

633. *Polarisation et dépolarisation produites par des réflexions totales successives.*

$ABCD$ (Fig. 763) est un parallélépipède de verre dont les angles aigus sont de 54° environ, et les angles obtus par conséquent de 126° . Un faisceau polarisé, entrant perpendiculairement par la face ca , éprouve deux réflexions totales en r et en s sous l'angle de 54° environ, et s'en va ressortir perpendiculairement par la face an . Si le plan de polarisation de ce faisceau fait un angle de 45° avec le plan de la double réflexion, l'on trouve qu'après l'émergence il y a en apparence *dépolarisation* complète, c'est-à-dire que le faisceau analysé avec la prisme biréfringent donne dans tous les sens deux images blanches et d'égale intensité.

Cependant la dépolarisation n'est qu'apparente; ce faisceau n'est pas véritablement un faisceau naturel; il en diffère par deux caractères essentiels :

1° Il reprend sa polarisation dans un plan unique lorsqu'en lui fait subir deux nouvelles réflexions totales sous le même angle dans un second parallélépipède semblable au premier, quelle que soit la direction du second plan de réflexion par rapport au premier. Si les deux plans coïncident, le nouveau plan de polarisation coïncide avec le premier;

2° En traversant des lames cristallines, il développe des teintes ayant d'autres caractères et soumises à d'autres lois que celles qui sont données par la lumière naturelle.

Enfin le faisceau dont il s'agit est *polarisé circulairement*, il est identique à l'un des faisceaux que nous avons obtenus dans l'expérience précédente avec le triple prisme de quartz: pour prouver cette identité, il suffit de soumettre à la double réflexion, dans le parallélépipède de verre, les deux faisceaux qui émergent du triple prisme. Chacun d'eux donne alors un faisceau polarisé; mais pour l'un le plan de polarisation fait 45° à droite du plan de réflexion, et pour l'autre 45° à gauche. Ce qui montre bien qu'ils sont polarisés circulairement et en sens contraire.

Il reste sans doute de nouvelles recherches importantes à faire sur ce sujet; mais ici, comme dans toutes les autres branches de l'optique, Fresnel a indiqué la véritable cause des phénomènes, et les analogies qu'il a établies entre les actions produites par la réflexion totale et celles qui s'exercent dans le cristal de roche, suivant son axe, ne peuvent manquer de devenir fécondes.

Couleurs des corps irrégulièrement aggrégés.

634. *Couleurs permanentes du verre trempé.*—Des lames de verre chauffées lentement jusqu'à un rouge et ensuite refroidies dans un air très froid, deviennent dures et fragiles; elles ont acquis un nouvel état d'aggrégation, une *trempe* analogue à celle de l'acier; toutes leurs propriétés physiques le démontrent, mais leurs propriétés optiques le font voir encore d'une manière plus frappante. Ces lames se comportent comme des lames cristallisées; elles colorent des plus vives nuances les faisceaux polarisés qui les traversent.

Pour observer ces couleurs, on peut simplement regarder avec la tourmaline une plaque de verre trempé, disposée horizontalement et recevant la lumière des nuées. En se plaçant sous l'angle de la polarisation complète, on aperçoit sur la seconde surface de la plaque des cercles et des bandes colorés offrant une sorte de symétrie bizarre. L'arrangement des couleurs change quand on tourne la tourmaline, et il change pareillement quand on tourne la plaque. Les phénomènes sont ici produits par les modifications qu'éprouve, en traversant la plaque, la lumière qui a été réfléchie et polarisée à sa seconde surface.

Les expériences peuvent être disposées d'une manière un peu plus commode, en polarisant, sur une grande glace noire, la lumière des nuées ou celle d'une lampe munie d'un globe dépoli; alors on tient la plaque de verre perpendiculairement au faisceau polarisé, et assez près de la glace; puis on l'observe à une certaine distance avec la tourmaline; en se procurant un assortiment de plaques rondes, ovales, carrées, triangulaires, hexagones, etc., d'un pouce ou deux de largeur, sur des épaisseurs variables, depuis 1 ligne jusqu'à 8 ou 10 lignes, on pourra étudier avec intérêt les apparences singulièrement étonnantes que présente dans ces circonstances la lumière polarisée. Nous nous contenterons d'indiquer ici quelques-uns des effets que l'on obtient.

Les plaques carrées donnent les apparences analogues à celles qui sont représentées dans les fig. 764 et 765, c'est-à-dire une croix noire au milieu, et des cercles vivement colorés aux quatre coins. Ce sont les anneaux formés autour de ces cercles qui viennent quelquefois, en se multipliant, envahir la croix noire, comme dans la fig. 765.

En tournant la lame dans son plan, on obtient la fig. 766.

Les plaques rondes donnent quelquefois les mêmes apparences que les lames de spath d'Islande perpendiculaires à l'axe; mais le plus souvent la croix noire et les anneaux sont distordus au point d'être à peine reconnaissables.

Une plaque hexagonale donne la fig. 767.

Une plaque rectangulaire la fig. 768.

En combinant diverses plaques, on obtient des effets plus compliqués, dans lesquels il n'est pas

toujours possible de reconnaître une apparence de symétrie.

Un fait très remarquable que présentent les lames trempées, c'est qu'on ne peut pas retrancher de leur ensemble un fragment un peu volumineux, sans que les couleurs du reste n'éprouvent une grande altération; c'est bien là une preuve que la trempe retient les molécules dans un état forcé où elles sont toutes solidaires, et que l'on ne peut rien déranger dans une des parties sans déterminer un nouvel arrangement dans l'ensemble.

En démontrant, par une expérience directe (606) que le verre prend la double réfraction quand on le comprime, Fresnel n'a laissé aucun doute sur la cause générale des phénomènes dont nous venons de parler. Toutes les couleurs que la lumière polarisée développe dans le verre trempé dépendent évidemment de l'inégale élasticité que prend alors l'éther dans les différents sens, d'où résulte inégalement de vitesse et interférences, comme dans les lames cristallisées. Mais il faudrait recourir à des expériences nombreuses, et surtout à une analyse difficile, si l'on voulait déterminer les lois suivant lesquelles cette élasticité change en passant d'un point à un autre.

635. *Couleurs accidentelles des corps inégalement comprimés ou dilatés.*—En perdant leur état forcé d'aggrégation, les verres trempés perdent la propriété de donner des couleurs; mais ils la reprennent en reprenant la trempe. On peut donc conclure que, si l'on parvenait à changer brusquement l'état d'aggrégation d'un corps diaphane pour le rétablir aussitôt, on lui imprimerait passagèrement des propriétés analogues à celles des lames cristallisées. C'est en effet ce qui arrive dans tous les corps où le changement produit est irrégulier, c'est-à-dire inégal dans les différents points. Les liquides et les gaz présentent des masses dont on ne peut pas troubler aisément l'homogénéité d'aggrégation; aussi ces substances ne peuvent-elles pas participer aux propriétés dont il s'agit; mais, à cette exception près, il suffit de comprimer inégalement un corps diaphane ou de le dilater inégalement pour qu'il donne des couleurs aux faisceaux polarisés. Nous en citerons quelques exemples.

Une lame de verre non trempé et bien recuit ayant, par exemple, un pied de longueur, un pouce de largeur et une ou deux lignes d'épaisseur, étant courbée dans sa longueur (Fig. 769), et traversée dans sa largeur par un rayon polarisé, donne naissance à des bandes colorées vives et distinctes. On remarque aussi que, de part et d'autre de la couche moyenne et qui conserve son état naturel, les couleurs suivent des lois opposées dans la partie convexe, où il y a dilatation, et dans la partie concave, où il y a compression.

En croisant à angle droit deux lames semblablement courbées, on obtient l'effet représenté dans la fig. 770, la diagonale *mn* est la ligne sans polarisa-

tion, suivant laquelle les effets contraires se détruisent. Cette expérience est de M. Brewster.

M. Biot a reconnu des traces de coloration pareilles dans une lame pendant qu'elle vibre.

La compression mécanique produit des effets analogues, comme l'ont démontré presque en même temps MM. Seebeck et Brewster, sur des lames de verre, pressées dans un étai, ou sur des gelées animales comprimées entre des lames de verre. Enfin le réchauffement ou le refroidissement inégal donnent encore les mêmes apparences. La *fig. 771* représente, par exemple, une lame rectangulaire de verre posée sur une barre de métal rouge de chaleur. Bien que la dilatation ne se fasse sentir d'abord que sur le côté *as*, les couleurs paraissent aussi sur le côté *ea*, sans doute à cause de l'état de compression que reçoivent les molécules dès l'instant que le côté *as* s'allonge par la dilatation.

Quelquefois la chaleur de la main est suffisante pour mettre une plaque de verre en état de donner des couleurs.

Les cristaux qui ne sont pas naturellement doués de la double réfraction se comportent comme le verre sous l'influence de la compression mécanique ou de la dilatation.

Les cristaux doués de la double réfraction sont aussi modifiés par ces influences : plusieurs physiiciens s'occupent en ce moment de recherches sur ce sujet.

De l'absorption de la lumière polarisée.

636. Les mouvements de vibration de la lumière polarisée s'accomplissent dans un sens déterminé, l'on conçoit qu'il puisse se présenter un grand nombre de cas où leur propagation se fasse autrement que celle de la lumière naturelle. Les cristaux nous en offrent en effet plusieurs exemples, parmi lesquels nous choisirons les plus frappants.

La *tourmaline* est un cristal à un axe doué de la double réfraction, comme le quartz et le spath d'Islande; car, en faisant un prisme de tourmaline dont l'arête soit parallèle à l'axe, et dont l'angle réfringent soit très petit, on voit les objets doubles en regardant au travers de ce prisme, et l'on peut distinguer aisément l'image ordinaire de l'image extraordinaire; mais, à mesure que l'œil s'éloigne du sommet de l'angle réfringent, de manière que les faisceaux transmis doivent traverser une plus grande épaisseur du cristal, on reconnaît que l'image ordinaire s'affaiblit peu à peu, et qu'elle finit par s'effacer complètement. Donc la tourmaline a la propriété d'absorber les faisceaux qui sont polarisés dans sa section principale, tandis qu'elle conserve la propriété de transmettre les faisceaux qui sont polarisés perpendiculairement à cette section,

ou les faisceaux extraordinaires. Cette propriété remarquable est extrêmement utile dans l'étude de la polarisation, et l'on voit maintenant le principe sur lequel elle repose. Il y a des tourmalines limpides ou légèrement bleuâtres, qui ne peuvent absorber le rayon ordinaire que quand elles ont une grande épaisseur, tandis que les tourmalines brunes peuvent produire cet effet avec une épaisseur qui n'est quelquefois qu'une fraction de millimètre.

Le *carbonate de baryte*, dans certaines directions, donne deux images à peu près d'égale intensité, tandis que, dans d'autres directions, il absorbe presque complètement l'un des faisceaux qui le traversent.

Le *mica*, lorsqu'il est en lames d'environ une ligne d'épaisseur et convenablement incliné sur le faisceau de lumière qui le traverse, ne laisse passer non plus qu'une image polarisée dans un seul sens. Par conséquent l'autre image est réfléchie ou absorbée.

M. Brewster a fait sur le *nitre* une autre observation intéressante : un prisme taillé dans une aiguille de nitre fait voir distinctement les deux images de la double réfraction; mais si l'on dépose un peu les faces du prisme, et que l'on y colle ensuite deux lames de verre parallèles, on fait disparaître tantôt l'une, tantôt l'autre des images, suivant l'espèce de colle que l'on emploie. Le baume de Copahu fait disparaître l'image ordinaire, et la laque d'œuf l'image extraordinaire. Cela tient évidemment à ce que le baume a un indice de réfraction à peu près égal à l'indice ordinaire du nitre, tandis que le laque d'œuf a un indice égal à son indice extraordinaire.

D'autres cristaux produisent des effets analogues.

M. Brewster a pareillement étudié le jeu des couleurs dans les substances qui sont douées de *dichroïsme*, c'est-à-dire qui laissent voir deux couleurs différentes, suivant qu'on les regarde dans un sens ou dans l'autre, et il a reconnu que ces couleurs dépendent de la position des axes optiques.

Le minéral appelé *dichroïte* (Haüy) ou *iolite*, à cause de sa belle couleur bleue, cristallise en prisme à douze pans; il est *bleu* quand on le regarde dans une section parallèle à l'axe, et *jaune-brun* dans les sections perpendiculaires.

Le *muriate de potasse* et de *palladium* cristallise en prisme à quatre pans; il est *rouge* dans le sens de l'axe, et *vert* dans le sens perpendiculaire.

L'*augite*, le *saphir*, l'*idocrase*, sont doués aussi d'une espèce de dichroïsme (Mém. de M. Brewster, *Transact. philos.*, 1819).

ÉLÉMENTS

DE

MÉTÉOROLOGIE.

AVERTISSEMENT.

On désignait autrefois sous le nom de *météores* tous les phénomènes qui se manifestent accidentellement dans les airs. Ainsi, l'*arc-en-ciel* et les *faux soleils* étaient des *météores lumineux*; les *trombes* et les *ouragans*, des *météores aériens*; les *pluies extraordinaires*, des *météores aqueux*; les *étoiles filantes*, les *globes de feu* et le *tonnerre*, des *météores enflammés*, etc. L'apparition de ces *météores* au sein de l'atmosphère excitait d'abord de l'effroi, comme l'apparition des comètes dans le ciel. Mais, après quelques siècles, les frayeurs de l'imagination firent place à l'esprit d'observation, et bientôt les causes occultes, chassées du ciel et de la terre, emportèrent avec elles les effets merveilleux, les prodiges et les présages menaçans.

Alors commença la véritable étude des *météores*. Le baromètre inventé par Galilée et Torricelli, en mesurant la pression atmosphérique, fit connaître aussi et les limites de l'atmosphère et l'étendue des variations qu'elle éprouve au milieu des secousses violentes des orages. Le thermomètre, soumis par Réaumur à une graduation constante et universelle, fut transporté dans les divers climats des deux mondes; d'intrépides voyageurs en firent usage sur les plus hautes montagnes du globe, dans les régions supérieures aux nuages, et l'existence des vapeurs sulfureuses ou inflammables, qui jouaient un si grand rôle dans l'atmosphère, fut d'abord mise en doute et bientôt abandonnée comme une hypothèse sans fondement. L'*arc-en-ciel*, les *parhélies* et les *faux soleils* furent ramenés aux lois ordinaires de l'optique par Descartes, Newton et Huyghens. Franklin découvrit la cause du tonnerre, et dès lors la foudre, docile aux lois de la science, descendit paisiblement des nuages orageux dans le laboratoire du physicien, pour y être soumise à l'expérience.

Après cette découverte l'on put étudier avec intérêt comme de simples jeux électriques, les *langues de feu* qui paraissent par intervalle aux mâts et aux cordages des vaisseaux, et d'autres feux pareils connus sous une foule de noms divers, qui avaient été observés par les anciens, aux sommets des édifices ou même aux piques des soldats, et qui avaient plus d'une fois jeté l'épouvante dans les légions romaines.

C'est ainsi que la connaissance des météores est peu à peu rentrée dans le domaine de la physique, et en est devenue l'une des applications les plus importantes.

Maintenant la météorologie n'a pas seulement pour objet l'observation des phénomènes accidentels autrefois connus sous le nom de météores, elle embrasse dans leur ensemble tous les phénomènes atmosphériques et tous les phénomènes terrestres, soit accidentels, soit permanens, qui dépendent de l'action du calorique, de l'électricité, du magnétisme et de la lumière. C'est une étude immense par son étendue autant que par ses résultats. Il s'agit en effet de déterminer tout autour du globe, sur les continents, et dans la masse si mobile de l'air et des eaux, les influences diverses et sans cesse changeantes, des quatre grands agens naturels dont nous avons déjà constaté la puissance.

Pour la chaleur, il faut déterminer les lois de ses variations à la surface de la terre suivant les jours et les périodes des saisons, depuis la zone torride jusqu'aux climats glacés des pôles; il faut chercher sa distribution dans les régions atmosphériques, dans la masse des eaux qui recouvrent la terre, et dans les différentes couches du sol, jusqu'aux dernières profondeurs où l'homme puisse faire pénétrer la sonde; il faut reconnaître l'influence de cette cause si universelle et si puissante, dans la formation des vapeurs et des brouillards, dans l'ascension et la suspension des nuages, dans la pluie, la neige et la rosée; enfin, il faut mesurer, s'il est possible, la quantité de chaleur donnée à la terre par le soleil, afin de remonter ainsi aux divers états de chaleur ou de froid par lesquels le globe de la terre a dû passer.

Pour la lumière, il faut chercher de combien les astres sont déplacés par la réfraction atmosphérique, et corriger cette espèce d'illusion invincible qui nous les fait voir loin de leur position réelle, à des distances qui varient suivant leur élévation apparente, suivant l'heure du jour ou de la nuit, et suivant l'état thermométrique des différentes couches de l'atmosphère; il faut chercher les causes qui donnent à la voûte du ciel sa forme et sa couleur; celles qui donnent aussi des aspects si variés aux eaux de la

mer et des lacs ; il faut expliquer la scintillation des étoiles , la couleur rouge qui se répand parfois sur le disque du soleil ou des astres ; enfin il faut expliquer le mirage , les *fata morgana* , et en un mot , toutes les apparences si multipliées que nous présentent les objets du ciel ou de la terre , lorsque nous les regardons au travers des couches plus ou moins pures de l'atmosphère ou au travers des couches plus ou moins limpides des grandes masses d'eau qui environnent la terre.

Pour l'électricité , il faut constater l'état électrique de l'air sous un ciel serein , et chercher comment il varie avec la hauteur , avec la sécheresse ou l'humidité et avec les climats brûlans , tempérés ou glacés ; il faut chercher ces mêmes élémens sous un ciel couvert de nuages , dans les temps calmes et dans les temps orageux ; il faut observer toutes les circonstances des orages et des explosions de la foudre , soit qu'elle éclate au milieu des airs , soit qu'elle frappe les objets de la terre ; il faut expliquer les conditions sous lesquelles les paratonnerres sont efficaces ou dangereux ; il faut rechercher les nombreux phénomènes atmosphériques qui dépendent de l'électricité ; enfin il faut découvrir la source elle-même qui reproduit sans cesse , dans une juste mesure , les fluides électriques qui se détruisent ou qui se recombosent sans cesse pendant les orages.

Pour le magnétisme , il faut déterminer à l'époque actuelle la direction des boussoles d'inclinaison et de déclinaison dans les deux hémisphères , la trace de l'équateur magnétique , celles des lignes sans déclinaison , les pôles magnétiques eux-mêmes et l'ensemble des lois suivant lesquelles l'intensité magnétique se trouve répartie sur les différens points des continents ou des mers. Ensuite , tous ces élémens n'ayant de fixité que pour une époque ou pour un instant , il faut chercher les lois compliquées suivant lesquelles ils changent avec le temps , et les causes primitives ou secondaires de ces changemens qui nous paraissent à la fois si extraordinaires et si difficiles à expliquer dans leur intensité et dans leur origine.

D'autres phénomènes plus complexes rentrent aussi dans le domaine de la météorologie : tels sont ceux qui se trouvent liés aux pressions atmosphériques , comme les mouvemens accidentels ou périodiques du baromètre , les vents , les trombes ou les ouragans ; la chute des aérolithes ou des autres substances météoriques ; tels sont encore ceux qui se trouvent liés à l'équilibre , au mouvement ou aux pressions des eaux , comme les marées et les mascarets , la hauteur et la vitesse des vagues , les sources naturelles ou thermales , les fontaines jaillissantes , et enfin toutes les

éruptions qui se montrent sur les différens points de la terre, depuis les filets gazeux de barigazo, jusqu'aux torrens de lave qui engloutissent des villes ou des provinces.

Telles sont les grandes questions dont s'occupe la météorologie ; nous ne pouvons pas avoir le dessein de les discuter en détail dans un ouvrage comme celui-ci, qui doit avant tout être élémentaire et peu volumineux ; mais nous essaierons au moins d'en discuter quelques points essentiels.

LIVRE NEUVIÈME.

MÉTÉOROLOGIE.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA CHALEUR TERRESTRE.

637. Les divers degrés de chaleur ou de froid exerçant une influence plus ou moins directe sur la plupart des phénomènes météorologiques, nous examinerons d'abord la question générale de la distribution de la chaleur dans le sein de la terre et de l'atmosphère. Pour résoudre cette question d'une manière complète, il ne faudrait pas seulement des observations passagères, faites sur quelques points isolés du globe, mais il faudrait des observations séculaires faites avec de bons instrumens dans tous les climats différens. Or, nous sommes loin de posséder ces élémens essentiels : la plupart des observations anciennes étaient faites comme au hasard et avec peu de précision ; la météorologie de la chaleur ne date en réalité que du commencement de notre siècle ; c'est alors que les immenses travaux de M. de Humboldt et les profondes recherches théoriques de M. Fourier et de M. Laplace ont puissamment concouru à lui donner son essor et sa véritable direction ; les bonnes observations sédentaires se sont multipliées, de nombreux voyages scientifiques ont été exécutés dans les hautes montagnes, sur toutes les mers et dans des pays jusqu'alors inconnus à la science. Les résultats qui ont été recueillis dans le court espace de ces trente dernières années forment déjà un vaste ensemble ; et s'ils sont encore incomplets par leur nombre et par la durée qu'ils embrassent, il est vrai de dire qu'ils conduisent à plusieurs grandes questions sur l'état thermométrique du globe, qui peuvent dès aujourd'hui être abordées et discutées avec des données précises.

Ce chapitre est consacré à l'examen de ces questions ; nous le diviserons en plusieurs articles, sous les titres suivans :

Température de l'air à la surface du sol.

Température à diverses profondeurs au-dessous du sol.

Température à diverses hauteurs au-dessus du sol.

Température des eaux.

De l'équilibre de température de la terre.

Température de l'air à la surface du sol.

638. *Disposition des instrumens.* — Lorsqu'on se propose de déterminer les températures d'un lieu par des observations sédentaires, il faut apporter le plus grand soin dans le choix et dans la disposition des instrumens.

Tout thermomètre est bon lorsqu'il est bien construit, pourvu qu'il ait été gradué d'après les véritables principes, et pourvu qu'il soit vérifié de temps à autre pour corriger les mouvemens du zéro (166). Avec ces conditions, le choix de la substance n'a plus qu'une légère importance : on peut se servir de mercure ou d'alcool, d'eau, d'huile ou de tout autre corps capable de supporter les variations de température sans changer d'état. Cependant la masse de l'instrument et son pouvoir rayonnant doivent entrer en considération : un gros thermomètre peut devenir inexact par son *insensibilité*, car s'il exige, par exemple, deux ou trois heures pour prendre la température ambiante, il ne donnera qu'une fautive indication des variations passagères ; un petit thermomètre, au contraire, reproduira fidèlement et à chaque instant les influences qui s'exercent sur lui. Un thermomètre à grand pouvoir rayonnant peut devenir inexact par sa *sensibilité*, car il s'échauffe ou se refroidit par deux causes : par le contact de l'air et par le rayonnement, qui exerce alors une partie notable de l'action totale. Or, comme on cherche seulement la température de

la masse d'air libre, il est évident qu'il faut, autant qu'il est possible, se mettre à l'abri du pouvoir rayonnant du thermomètre, et ne laisser agir sur lui que le contact de l'air dont on veut connaître la température.

Voici un instrument dont je me suis servi avec avantage pour avoir avec exactitude la température de l'air, et pour estimer par conséquent les erreurs que l'on peut commettre avec les thermomètres ordinaires.

On a (Fig. 772) est un réservoir en fer rempli de mercure, auquel on adapte, d'une manière fixe, un thermomètre ordinaire t et un thermomètre différentiel u , qui a été gradué avec beaucoup de soin. Le thermomètre t donne la température exacte de la boule s , et il suffit d'observer la position du sommet de la colonne liquide entre les points p et s' , pour en déduire rigoureusement la température de la boule s' . Tout se réduit donc à faire en sorte que cette boule s' prenne toujours à chaque instant la température de l'air, et l'on y parvient autant qu'il est possible en la faisant légère et en dorant sa surface. La marche de cet instrument comparée à celle d'un thermomètre ordinaire exposé librement dans un lieu convenable, m'a conduit à cette conclusion : que la température donnée par les méthodes reçues peut se trouver en erreur de plus d'un degré sur la véritable température de l'air. Il était utile d'appeler sur ce sujet l'attention des météorologistes.

Cependant il ne faut pas prétendre que l'on puisse arriver d'abord au dernier degré de précision. Les méthodes ordinaires présentent déjà d'assez nombreuses difficultés, et les approximations qu'elles donnent sont bien suffisantes pour le moment ; nous en recommandons donc particulièrement l'usage à tous ceux qui peuvent avoir l'occasion de les employer au profit de la science.

L'exposition des instruments est la véritable principe de l'exactitude des observations. Il est évident d'abord qu'un thermomètre destiné à donner la température de l'air doit essentiellement être exposé au nord. Il faut de plus qu'il soit abrité autant qu'il est possible du rayonnement que pourraient exercer sur lui des parois voisines soit verticales, soit inclinées ; il faut enfin que l'air l'enveloppe et circule librement autour de lui. Pour donner une idée plus précise de ces dispositions, nous décrirons ici le thermomètre de l'Observatoire royal de Paris (Fig. 773).

s est une espèce de tambour composé de deux forts cercles de bois, réunis l'un à l'autre par des traverses a et a' . Ce tambour peut tourner sur un axe en fer x et x' , scellé dans le mur. Le thermomètre est représenté en tt' ; son échelle, qui est en verre, se trouve ajustée comme l'une des traverses a et a' : il est ordinairement exposé vers l'extérieur ; mais lorsqu'on veut faire une observation, l'on fait tourner le tambour pour amener les divisions devant l'œil de l'observateur.

Cet appareil est exposé directement au nord, et ne reçoit par conséquent le soleil que pendant quelques heures le matin et le soir, depuis l'équinoxe du printemps jusqu'à l'équinoxe d'automne, car il n'est pas abrité.

Ces dispositions pourraient être remplacées par d'autres qui n'offriraient pas moins d'avantages.

639. Détermination des températures moyennes.

Autrefois l'on n'avait pas une notion exacte de ce que l'on doit appeler une température moyenne : on se contentait de choisir la plus haute et la plus basse température de l'année, et leur moyenne ou leur demi-somme était prise pour la température moyenne de l'année : c'est ainsi que procédaient Lahire, Mairan, Maraldi, à l'Observatoire de Paris ; Celsius à Upsal, etc. Réaumur même suivit cette méthode, mais il en reconnut l'inexactitude.

Présentement on appelle *température moyenne d'un jour*, celle que l'on obtiendrait en ajoutant entre elles les observations faites à tous les instans de la journée, et en divisant cette somme par le nombre des instans. Cette définition est purement logique : elle définit ce que l'on cherche, mais elle ne donne pas le moyen du le trouver, car il serait physiquement impossible d'observer à tous les instans de la journée. Nous allons faire comprendre le sens que l'on doit y attacher. Prenons, par exemple, la seconde pour intervalle de temps ; dans un jour de vingt-quatre heures, il y a 86400 secondes ; supposons que si l'on fasse dans un jour 86400 observations de seconde en seconde, qu'on les ajoute et qu'on divise leur somme par leur nombre 86400 ; on aura ainsi la température moyenne du jour, car les variations thermométriques se font avec une telle lenteur, que le résultat sera certainement le même que si l'on avait observé de demi-seconde en demi-seconde, ou même de centième de seconde en centième de seconde. Il y a plus, c'est qu'il n'est nullement nécessaire d'observer de seconde en seconde, pas même de minute en minute. Par exemple, vingt-quatre observations faites d'heure en heure, ajoutées entre elles et divisées par 24, donneraient encore le même résultat définitif que les 86400 observations faites de seconde en seconde. Tout se réduit donc à trouver une température qui soit conforme à la définition précédente, quel que soit le moyen que l'on emploie pour la trouver.

Or, les nombreuses expériences qui ont été faites montrent, d'une manière certaine, que pour arriver à la vraie *température moyenne* d'un jour, telle qu'elle vient d'être définie, on peut employer, avec un avantage à peu près égal, les deux méthodes suivantes :

1^o Prendre la moyenne de trois observations faites comme il suit :

- La première, au lever du soleil ;
- La deuxième, à 2 heures de l'après-midi ;
- La troisième, au coucher du soleil.

Par exemple le 17 janvier 1830, le thermomètre marquait à Paris :

Au lever du soleil.	— 18°
A 2 h. après-midi.	— 10
Au coucher du soleil.	— 13
Somme.	— 41

dont le tiers est — 13°, 6 ; c'est la température moyenne du 17 janvier 1830 ; c'est le minimum de l'année.

2° Prendre la moyenne des deux températures, maximum et minimum de la journée.

Ainsi le 29 juillet 1830, on avait à Paris ;

Pour le point le plus haut du thermomètre.	31° à 3 h. 1/2.
Pour le point le plus bas.	20, 5 à 4 h. du matin.
Somme.	51, 5

dont la moitié est 25°, 7 ; c'est la température moyenne du 29 juillet 1830 ; c'est le maximum de l'année.

Cette seconde méthode est celle que l'on emploie à l'Observatoire de Paris. On se sert pour cela du thermomètre que nous avons décrit ; mais l'on obtiendrait à la fois, et beaucoup plus de commodité pour les observations, et sans doute un peu plus d'exactitude, si l'on employait un thermomètre à maxima et minima, tel que celui que nous avons décrit page 118, figures 155 et 156.

La température moyenne d'un mois est la somme des températures moyennes de tous les jours du mois, divisée par le nombre de ces jours.

Sur plusieurs registres d'observations, l'on a continué de diviser les 30 jours en trois séries de 10 jours ; alors, après avoir pris la moyenne pour chacune de ces séries, il reste à prendre la moyenne des trois séries. Ainsi pour le mois de juillet 1830, les moyennes des trois séries étaient :

Du 1 ^{er} au 10	16,3
Du 11 au 21	18,5
Du 22 au 31	21,8
Somme	56,6

dont le tiers est 18,9 ; c'est la température moyenne du mois de juillet 1830.

La température moyenne de l'année est la somme des températures moyennes des douze mois, divisée par 12. Mais il est important de remarquer que l'on arrive au même résultat, ou à peu près, par deux autres méthodes : 1° en prenant seulement la moyenne du seul mois d'octobre ; 2° en prenant la moyenne des températures correspondantes à une seule heure de la journée, qui serait pour notre latitude l'heure de 9 heures du matin. Les deux tableaux suivants donneront une idée de l'exactitude à laquelle on arrive par ces deux méthodes approximatives.

1°. Comparaison des vraies moyennes et des moyennes données par le mois d'octobre (HUMBOLDT, *Mémoire d'Arcueil*, T. III.)

NOMS DES LIEUX.	Température moyenne de l'année.	Température moyenne du mois d'octobre.	Température moyenne du mois d'avril.
Caire.	25° 4	25° 4	25° 5
Alger.	21 0	22 3	17 0
Natchez.	18 9	20 2	19 1
Rome.	15 8	16 7	15 4
Milan.	13 2	14 5	13 1
Cincinnati.	12 4	12 7	13 3
Philadelphie.	11 9	12 2	12 0
New-York.	12 1	12 5	9 5
Pekin.	12 6	13 0	13 9
Inde.	10 6	11 5	9 5
London.	11 0	12 3	9 9
Paris.	10 6	10 7	9 0
Genève.	9 8	9 6	7 6
Dublin.	9 2	9 3	7 4
Edimbourg.	8 8	9 0	8 3
Göttingue.	8 3	8 4	6 9
Frankfurt.	11 3	12 7	10 0
Copenhague.	7 6	9 3	5 0
Stockholm.	5 7	5 8	3 6
Christiana.	5 9	4 0	5 9
Upsala.	5 4	6 3	4 3
Quebec.	5 5	6 0	4 2
Petersbourg.	3 8	3 9	2 8
Abo.	5 2	5 0	4 9
Drontheim.	4 4	4 0	1 3
Uleå.	0 6	3 5	1 2
Umeå.	0 7	3 2	1 1
Cap-nord.	0 0	0 0	— 1 0
Enontekiä.	— 2 8	— 2 5	— 3 0
Nain.	— 3 1	+ 0 8	— 2 5

Ce tableau fait voir que les moyennes d'octobre sont assez rapprochées de celles de l'année, même pour des latitudes très différentes ; nous avons rapporté aussi les moyennes du mois d'avril, afin de montrer qu'en général elles sont au peu trop faibles pour représenter les vraies moyennes de l'année.

2°. Comparaison des vraies moyennes et de celles qui seraient données par les observations de 9 heures pour l'Observatoire de Paris, année 1829.

Noms des mois.	Moyennes tempé- ratures des mois.	Moyennes tempé- ratures de 9 heures du matin.
Janvier.	— 2° 0	— 2° 6
Février.	+ 2 7	+ 2 0
Mars.	+ 5 7	+ 5 6
Avril.	+ 9 8	+ 11 1
Mai.	+ 14 9	+ 16 4
Juin.	+ 17 1	+ 19 1
Juillet.	+ 18 6	+ 19 3
Août.	+ 17 0	+ 18 3
Septembre.	+ 13 7	+ 15 0
Octobre.	+ 10 0	+ 9 9
Novembre.	+ 4 7	+ 4 2
Décembre.	— 3 5	— 4 1
Moyennes.	+ 9 1	+ 9 6

La moyenne température donnée par la méthode directe est 9° 1; celle qui serait donnée par le mois d'avril serait 9° 8, par le mois d'octobre 10° 0, et enfin celle qui est donnée par les moyennes de 9 heures du matin est 9° 6, qui ne s'écarte de la vraie moyenne que d'un demi-degré; sur quoi l'on peut remarquer que si les observations de 9 heures sont bonnes pour donner la moyenne de l'année, elles seraient inexactes pour donner la moyenne des mois; elles conduiraient à des résultats trop forts pour les mois chauds, et trop faibles pour les mois froids.

Enfin, l'on ne cherche la température moyenne de l'année que pour arriver à la *température moyenne du lieu*; celle-ci est la *moyenne de toutes les moyennes annuelles*. Il faut de nombreuses années d'observation pour obtenir un résultat qui approche un peu de la vérité, et même cette vérité n'existe que sous une condition; elle suppose que les changements de température auxquels une localité se trouve soumise sont des changements qui s'accomplissent par oscillation et non par progression. Si un climat pouvait être d'une manière indéfinie progressivement chaud ou progressivement froid, il ne faudrait pas chercher sa température moyenne sans cesse changeante; il faudrait chercher la loi de la progression croissante ou décroissante de cette température; elle serait irrégulière sans doute, mais elle existerait; tout phénomène durable est soumis à une loi. Les observations tendent à démontrer que tous les climats de la terre sont stables, et que leurs vicissitudes ne sont que des périodes ou des oscillations plus ou moins étendues. Il existe donc une température moyenne propre à chaque lieu, et c'est là une donnée fondamentale que nous avons à déterminer. Dans les climats où les observations de plusieurs années successives donnent des moyennes très différentes, il faut un très grand nombre d'années pour obtenir une température moyenne qui approche de la vérité. S'il arrive, par exemple, que la plus grande différence entre les moyennes de vingt années consécutives s'élève jusqu'à 6°, on pourra supposer, avec quelque probabilité, que cent années d'observation donneront une moyenne qui sera encore en erreur de 1/100 de degré ou de 1/20 de degré. Au contraire, si la plus grande différence entre ces moyennes ne s'élève qu'à 1°, on pourra supposer que cent années d'observation donneront une moyenne dont l'erreur ne dépassera pas 1/100 de degré. Ces considérations deviendront plus faciles à comprendre par un exemple. Voici, d'après M. Bouvard (*Mémoires sur les observations météorologiques faites à l'Observatoire royal de Paris, Paris, 1827*), les moyennes annuelles de Paris pour vingt-une années, de 1806 à 1826 inclusivement :

1806	12° 1
1807	10 8

1808	10 3
1809	10 6
1810	10 6
1811	12 0
1812	9 9
1813	10 2
1814	9 8
1815	10 6
1816	9 4
1817	10 4
1818	11 4
1819	11 1
1820	9 8
1821	11 1
1822	12 1
1823	10 4
1824	11 2
1825	11 7
1826	11 4

Moyenne définitive. 10° 8

Pendant ces 21 années, la plus basse moyenne appartient à 1816 : elle est de 9° 4; la plus haute appartient à 1806 et à 1822 : elle est 12° 1; leur différence, qui est la différence *maximum*, s'élève à 2° 7; ainsi la moyenne 10° 8, qui résulte des 21 années, est en erreur probable de 2° 7, divisé par 21, c'est-à-dire 0° 13. Si l'on pouvait admettre que toutes les causes accidentelles qui modifient les températures annuelles se sont développées pendant la durée de cette période de 21 ans, et qu'on a touché les deux limites extrêmes entre lesquelles s'accomplit l'oscillation des températures moyennes, il serait assuré que cent années d'observation donneraient la véritable moyenne de Paris avec une approximation de 2° 7 divisé par 100, ou environ 3 centièmes de degrés. Mais si pendant le cours d'un siècle on tombe sur une moyenne un peu plus basse que 9° 4, ou un peu plus haute que 12° 1, on sera certain que la moyenne de Paris déterminée par ces 100 années, se trouvera en erreur de plus de trois centièmes de degré.

Après avoir indiqué les procédés simples et précis par lesquels on peut arriver à connaître la température moyenne d'un lieu, nous allons essayer de présenter dans leur ensemble et de discuter les résultats qui ont été obtenus jusqu'à ce jour sur un grand nombre de points du globe; nous prendrons pour guide le grand travail que M. de Humboldt a publié sur ce sujet dans le troisième volume des *Mémoires de la Société d'Arcueil*. Nous emprunterons aussi plusieurs résultats consignés dans les autres ouvrages de cet illustre voyageur.

640. *Discussion des températures moyennes.* — *Lignes isothermes.* Sur un même méridien, la température moyenne diminue en allant de l'équateur vers les pôles, et sur une même verticale la tem-

pérature diminue avec l'élévation absolue. Ainsi la latitude et la hauteur au-dessus du niveau de la mer sont les deux causes générales qui déterminent la température moyenne d'un point de la terre; mais l'influence de ces causes est modifiée par une foule d'influences accidentelles ou locales : la distance à la mer, la présence des montagnes, la nature du sol, sa culture et son inclinaison, la direction des vents et tous les phénomènes atmosphériques, sont autant de causes secondaires, tantôt constantes et tantôt variables, qui modifient sans cesse les deux causes générales. On conçoit dès lors qu'il devient très difficile d'établir de l'ordre au milieu de cette confusion, et de soumettre à une loi commune des phénomènes si variés. Voici cependant quelques définitions qui nous serviroient à rapprocher les résultats et à les embrasser dans une seule pensée.

Concevons, par exemple, qu'un voyageur fasse le tour du monde en partant de Paris, et qu'il passe par tous les points de l'hémisphère boréal, pour lesquels la température moyenne est, comme à Paris, de 10° 6; la route qu'il aura parcourue formera autour de la terre une courbe d'égal chaleur; c'est ce que l'on nomme une *ligne isotherme*. Ainsi une *ligne isotherme* est celle qui passe par tous les points de la surface de la terre pour lesquels la température moyenne est la même. La ligne isotherme de 10° 6 est loin de coïncider avec le *parallèle* de Paris; elle est irrégulière et sinuée, c'est-à-dire qu'elle passe par des points dont la latitude est très différente de la latitude de Paris. On peut concevoir de même la ligne isotherme correspondante à une autre température moyenne quelconque; elle pourra être sinuée comme celle de Paris, mais suivant d'autres lois qui lui sont propres. L'espace compris entre deux lignes isothermes est ce que l'on appelle une *bande isotherme* ou une *zone isotherme*. Ainsi la zone isotherme de 10° à 5° est celle qui est comprise entre les lignes isothermes de 10° et de 5°.

Nous nous bornerons ici à diviser l'hémisphère boréal en six zones isothermes, savoir :

- 1° La zone de 30° à 23° 5; c'est la zone torride;
- 2° . . . de 23 5 à 20
- 3° . . . de 20 à 15
- 4° . . . de 15 à 10
- 5° . . . de 10 à 5
- 6° . . . de 5 à 0

Nous rapporterons seulement, pour chacune de ces zones, les températures moyennes de quelques points ayant des longitudes très différentes, afin de donner une idée de leur disposition générale autour de la terre.

Zone torride, bande isotherme de 30 à 23° 5.

NOM DU LIEU.	Latitude.	Longitude.	Hauteur.	Température moyenne.	
Pondichéry.	11° 55' n.	75° 32' e.	0	29, 6	
Canton.	10 37 n.	67 55 o.	0	27, 7	
St.-Louis de Maranhão.	2 36 n.	51 10 o.	0	27, 4	A. Pereira Lago.
Beçed (Jambi-que).	18	101 10 e.	0	27, 0	Hunter.
Batavia.	6 12 s.	104 24 e.	0	26, 6	
Madras.	13 4 s.	79 8 e.	0	26, 0	
Bombay.	18 56 s.	70 18 e.	0	26, 7	
Benagali.	15 55 s.	88 10 e.	0	26, 3	
La Havane (côte).	23 9 n.	85 43 o.	0	25, 7	
Vera-Cruz.	19 11 n.	98 21 o.	0	25, 6	
Masil.	14 36 s.	118 32 e.	0	25, 6	
Amboine.	6 0 s.	105 10 e.	0	25, 4	
Congo.	00	0	215	25, 6	Smith.
Benarès.	25 20 n.	82 30 e.	0	25, 2	
B.-Jouba.	27 54 s.	45 38 o.	0	25, 3	
Mécon.	27 12 s.	111 15 e.	0	25, 3	
La Havane (intérieur des terres).	23	80	1000	25	

Zone isotherme de 23, 5 à 20°.

St.-Louis de Yé-ville.	26-28°			23, 6	Deitch et Esclat.
Régéda.	23 30 s.	43° 5' e.		23, 3	
Canton.	25 8 s.			22, 6	
Le Caire.	30 2 s.	26 48 e.		22, 4	
Alger.	36 49 n.	0 41 e.	0	21, 1	
Plaines de Tébessa.				20, 2	

Zone isotherme de 20 à 15°.

Nagles.	40-50 n.	11° 56 e.		16, 5	
Fouchal.	33 37	19 18 e.		16, 1	Heineken.
Natchez.	31 28	93 50 o.	50 1	16, 2	
Toulon.	43 7 n.	5 36 e.	0	16, 7	
Nice.				16, 0	Rosa.
Nagasaki.	32 45 n.	1 28 e.	0	16, 0	
Luques.	45 49 s.	8 15 e.		15, 8	
Rome.	41 54 s.	12 8 e.	0	15, 6	
Gènes.	44 25 s.	6 32 e.		15, 7	
Nîmes.	43 51 s.	1 1 e.		15, 7	
Taragona.				15, 4	D'Hombres Fermes.
Alais.	44 10 s.	1 40 e.		15, 4	
Perpignan.	43 42 s.	0 54 e.		15, 3	
Montpellier.	43 32 s.	1 33 e.	0	15, 3	

Zone isotherme de 15 à 10°.

Arles.	43-40 n.	2° 47 e.		15, 5	
Williamsbourg.	43 16 n.	3 1 e.		15, 4	Gambart.
Marseille.				15, 4	
Ros.	44 31 s.	0 15 e.		15, 9	
Rhodes.	45 33 s.	5 2 e.		15, 8	
Ale.	25 36 s.	10 4 e.		15, 3	
Vénice.	45 50 s.	2 54 e.		15, 3	
Bordeaux.	48 42 s.	11 29 e.		15, 5	
Lisbonne.	44 29 s.	9 15 e.		15, 3	
Bologne.	45 16 s.	8 41 e.		15, 2	
Vercos.	45 29 s.	6 58 e.		15, 2	
Nîmes.	45 44 s.	1 29 e.		15, 2	
Montauban.	44 1 s.	0 60 o.		15, 4	
Pekin.	39 54 s.	114 48 e.		12, 7	
Tourna.				12, 2	
Nantes.	47 13 s.	6 55 e.		12, 6	
Saint-Malo.	48 29 s.	4 21 o.	0	12, 3	
Die.	45 41 s.	3 35 e.		12, 3	
Calcutta.	22 6 n.	85 3 e.		12, 4	
New-York.	40 40 n.	74 18 o.	84	12, 1	
Philadelphie.	39 57 n.	77 32 o.		11, 16	
La Rochelle.	46 10 s.	3 29 o.		11, 87	Fleurbaey
Poitiers.	46 35 s.	1 60 o.		11, 5	de Belleme
Frankfort.	50 36 s.	8 2 e.		11, 0	
Bruxelles.	50 51 s.	3 2 e.		11, 0	
Amsterdam.	52 32 s.	2 35 e.		10, 9	
Beaune.	47 14 s.	4 45 e.	150	10, 2	
Bude.	47 39 s.	16 41 e.		10, 6	Falguet.
Paris.	48 56 s.	0 00		10, 6	
Dijon.	47 20 s.	2 45 e.	455	10, 6	
Dunkerque.	51 3 s.	0 3 e.		10, 5	
Vannes.	48 13 s.	14 3 e.	76	10, 5	
Le Havre.	49 31 s.	1 18 o.		10, 7	
Cambridge.	42 25 s.	75 23 e.		10, 1	
Munich.	49 29 s.	8 8 e.	72	10, 1	
Cernob.	45 47 s.	0 45 o.	210	10, 1	
Wien.	48 3 s.	1 6 e.		10, 1	
Wienfeld (Nassau).	42	0		10, 1	Davis.

Zone isotherme de 10 à 5°.

NOM DES VILLES.	Latitude.	Longitude.	Hauteur.	Température moyenne.	
Strasbourg.	48 35'	52° 5' E.	0	9.7	Hermann.
Prague.	50 5	12 4 E.	0	9.7	
Genève.	46 12 E.	3 48 E.	180	9.6	
Berne.	46 56	8 8 E.	175	9.6	Kiewan.
Dublin.	53 21 N.	8 39 E.	0	9.5	
Cairo.	46 50 N.	7 10 E.	312	9.4	
Vasovic.	52 14	16 53 E.	0	9.2	Playfair.
Edinbourg.	55 58 N.	0 30 E.	0	8.8	
Zurich.	47 22	8 12 E.	125	8.8	
Cardron.	56 15	"	"	8.5	Vallenberg.
Gottweig.	51 32	7 55 E.	76	8.5	
Des Malouines.	51 25	62 10 W.	0	8.5	
Berlin.	52 50	"	"	8.5	Kerman.
Kendal.	54 47	5 6 E.	0	7.6	
Copenhague.	55 41 N.	10 14 E.	0	7.8	
Fayetteville.	42 38	"	"	7.2	Feld.
Ellesborg.	60 19	"	"	6.5	
Konigsberg.	55 50	"	"	6.15	
Courant de Prusse.	47 47	8 14 E.	511	8.	Borsherg.
Stockholm.	59 21 N.	15 45 E.	0	5.7	
Upsal.	56 51	15 48 E.	0	5.8	
Quebec.	46 47 N.	73 30 E.	0	5.4	Ermann.

Zone isotherme de 5 à 0°.

Christiana.	59 57	8 28 E.	0	4.9	Tobiasen.
Abo.	60 27	19 58 E.	0	4.5	
Maesou.	52 46 N.	28 15 E.	145	4.5	
Dronkheim.	53 24	8 2 E.	0	4.4	Kupfer.
Petersbourg.	46 56 N.	27 59 E.	0	3.8	
Cronstadt.	"	"	28	3.8	
Kaasa.	53 46	47 6 E.	20	2.5	Ermann.
Umea.	63 00	17 58 E.	0	0.7	
Lytjoi (Island).	66 30	"	"	0.6	
Ulen.	62 8	23 8 E.	0	0.8	Ermann.
Stations.	55 8	57	185	0.6	
Cap-Nord (de Magiore).	71 0	23 30 E.	0	0.0	

RÉGIONS POLAIRES.

Comberland- Hesse.	54	104 30 n.	— 1. 0	Franklin.
Nain.	"	113 30 n.	— 5. 0	"
Fort-Entreprise.	61 30	"	— 6. 2	Franklin.
Vinter-Island.	66 12	83 30	— 12. 5	Parry.
Inglood-Island.	69 30	64	— 15. 6	Parry.
Melville-Island.	75	113	— 19. 3	"

EN MER.

En mer.	78 45	5 à 4	— 7.5	Scoreby.
En mer.	78	15 à 18	— 8.5	Id.

Zone torride. Entre le troisième degré de latitude boréale et le troisième degré de latitude australe, on ne connaît qu'une seule détermination de température moyenne qui semble précise; c'est celle de Saint-Louis de Naurham, 27°, 4.

Pour les latitudes inférieures à 10° 30' on ne connaît au sud que la température moyenne de Batavia, 26°, 9, et au nord celle de Cumana, 27°, 7.

On conclut de ces données que la température moyenne est sous l'équateur comprise entre 27°, 5 et 28°. Cette moyenne est modifiée comme nous le verrons par la grande étendue des mers équatoriales; sous la ligne, les continents n'occupent que la sixième de la circonférence de la terre. Ainsi en se rapprochant des tropiques et particulièrement du tropique du cancer, nous ne devons pas être étonnés que l'on trouve, comme à Pondichéry, des

températures moyennes qui dépassent sensiblement celle de l'équateur.

Cependant les lignes isothermes de 23°, 5 sont très peu sinuées; tout semble indiquer qu'elles ne font que de très petites excursions de part et d'autre des tropiques.

Zone de 23°, 5 à 20°. Cette zone embrasse des latitudes très différentes: Alger, qui se trouve à peu près sous le méridien de Paris, est un des points qui s'avancent le plus vers le nord, et l'on reconnaît déjà dans les lignes isothermes qui avoisinent 20° une tendance à être convexes vers le pôle dans leurs points qui correspondent au centre de l'Europe.

Zone de 20° à 15°. Cette zone passe par les côtes de France sur tout le littoral de la Méditerranée par une latitude moyenne de 43°, et ensuite elle se rabaisse, soit à l'est vers Nongasacki et les côtes du Japon, soit à l'ouest vers Natchez, sur les bords du Mississipi auprès du golfe du Mexique.

Zone de 15° à 10°. Si l'on prend encore dans cette zone les villes de France dont la température moyenne est de 12° à 13°, on voit que leurs latitudes sont plus grandes que celles des points de même température, soit à l'est comme Pékin, soit à l'ouest comme Cincinnati, New-York et Philadelphie. Aussi dans la zone tempérée, à latitude égale, le climat d'Europe est plus chaud que les climats de l'Asie et de l'Amérique.

Zone de 10° à 5°. En comparant les températures moyennes de Fayetteville et de Copenhague, celles de Québec et de Stockholm, celles de Kendal et de Berlin, on reconnaît de plus en plus la différence qui existe entre le climat du méridien de Paris et les climats qui sont à l'est et à l'ouest de ce méridien.

Zone de 5° à 0°. Il est à regretter que l'on ne possède pas dans cette zone quelques séries d'observations dans la Sibérie et dans le nord de l'Amérique. Ces observations seraient d'autant plus intéressantes qu'elles permettraient de tracer avec quelque précision les limites où va s'éteindre la végétation.

Régions polaires. — Les températures des régions polaires contenues dans le tableau précédent, sont déduites des observations de trois grands navigateurs qui ont fait de célèbres excursions dans ces parages: le capitaine Franklin, en 1819, 1820 et 1821; le capitaine Parry, en 1819 et 1820, puis en 1821, 1822 et 1823; le capitaine Scoresby, en douze années, depuis 1807 à 1818. Ces moyennes annuelles ont été déduites, tantôt des observations journalières continuées pendant toute l'année, tantôt des observations de quelques mois seulement. On sera sans doute frappé de la différence prodigieuse qui existe, à latitude égale, entre les températures trouvées en pleine mer et celles qui ont été observées en différents ports, comme Melville Island; puisqu'en mer, à 70°, la température moyenne est de — 8° 3, tandis qu'à Melville-

Island, à 75° seulement, elle est de — 18° 5. Cette différence est due en partie à ce que la première moyenne est déduite des mois d'avril, mai, juin et juillet, tandis que la dernière résulte d'observations directes. Mais certainement M. Scoresby n'a pas pu se tromper beaucoup dans ses déductions, et il reste bien constant que sur les continents polaires l'atmosphère est plus froide que sur la mer. Si l'on part de ces données pour appliquer quelques formules approximatives, on peut présumer avec beaucoup de raison que la température du pôle lui-même doit être comprise entre 25 et 30° au-dessous de 0°.

Après avoir rapporté l'ensemble des résultats connus sur les températures moyennes des divers lieux de la terre, nous avons à nous occuper de la distribution de la chaleur dans un même lieu, suivant les jours, les mois et les saisons. Car tout le monde sait que deux lieux situés sur la même ligne isotherme, et possédant des températures moyennes parfaitement égales, peuvent cependant avoir des climats excessivement différents par leurs productions végétales et par l'influence qu'ils exercent sur l'économie animale.

841. *Des températures moyennes des jours, des mois et des saisons, des températures extrêmes et des climats.*

Les climats sont caractérisés, en ce qui dépend de la chaleur, et par la température moyenne de l'année et par les variations que la température des jours, des mois et des saisons peut éprouver. On peut dire que le climat est *brûlant* dans la zone torride, *chaud* dans la zone de 23° 5 à 20°, *doux* dans la zone de 20 à 15°, *tempéré* dans la zone de 15 à 10°, *froid* dans la zone de 10 à 5°, *très froid* dans la zone de 5° à 0 et *glacé* dans la zone dont la température moyenne est au-dessous de 0. Mais les climats qui appartiennent à la même zone ou à la même ligne isotherme doivent se distinguer entre eux : et nous proposerons d'appeler *climats constants* ceux qui n'offrent pas de grandes différences dans le cours de l'année entre les extrêmes de la chaleur et du froid, *climats variables* ceux qui offrent d'assez grandes différences, et, d'après Buffon et M. de Humboldt, nous appellerons *climats excessifs* ceux qui offrent de très grandes différences. Le tableau suivant offrira un exemple de cette distinction.

Noms des lieux.	Températ. moyenne de l'année.	Températ. moy. du mois le plus chaud.	Températ. moy du mois le plus froid.	Différen- ces.
Funchal. . . .	20,3	24,2	17,3	6,4
—	—	—	—	—
Saint-Malo. . .	12,3	19,4	5,4	14,0
Paris.	10,6	18,5	2,3	16,2
Londres. . . .	10,3	18,0	3,2	16,8
—	—	—	—	—
New-York. . .	12,1	27,1	3,7	30,8
Pékin.	12,7	29,1	4,1	33,2

Funchal a un climat constant; nous aurons occasion de remarquer que ce caractère appartient presque toujours aux climats des îles.

Saint-Malo, Londres et Paris offrent un exemple de climats variables, tandis que New-York et Pékin ont évidemment des climats excessifs.

Il suffit de réfléchir un instant sur l'influence prodigieuse que la chaleur et le froid exercent sur tous les êtres organisés, pour concevoir qu'à température moyenne égale, les productions ne peuvent être les mêmes dans les climats excessifs et dans les climats constants ou variables.

Ce n'est pas seulement par ces distinctions tranchées que les climats peuvent être caractérisés : s'il suffit de quelques degrés de froid de plus pour faire mourir les plantes et de quelques degrés de chaleur de plus pour faire mûrir les fruits, il est évident aussi que l'époque et la durée des grandes chaleurs et des grands froids sont des éléments indispensables à la connaissance des climats. Ainsi les observateurs ne doivent pas songer seulement à déterminer les températures moyennes de l'année et les températures moyennes des mois les plus chauds et les plus froids : mais ils doivent parvenir enfin à déterminer la distribution de la chaleur dans tout le cours de l'année, et pour cela les observations journalières sont nécessaires. Ces observations une fois faites il ne reste plus qu'à les combiner d'après de bonnes méthodes pour arriver aux températures moyennes des jours, des mois et des saisons.

Nous ne terminerons pas cet article sans rapporter encore, d'après M. Arago, les extrêmes de chaleur et de froid qui ont été observés à l'Observatoire de Paris, et les plus hautes températures de l'air qui ont été observées dans divers climats (*Annuaire du bureau des longitudes*, 1825).

Maximum de chaleur.

DATES.		TEMPÉRATURE.	
Années.	Mois.	Dég. Réaumur.	Dég. centig.
1706	8 août	+28,2	+35,3
1753	7 juillet	+28,5	+35,6
1754	14 juillet	+28,0	+35,0
1755	14 juillet	+27,8	+34,7
1793	8 juillet	+30,7	+38,4
1793	10 juillet	+29,8	+37,3
1800	18 août	+28,4	+35,5
1802	8 août	+29,1	+36,4
1803	8 août	+29,4	+36,7
1808	15 juillet	+29,0	+36,2
1818	24 juillet	+27,6	+34,5

Maximum du froid.

1709	13 janvier	—18,5	—23,1
1716	id.	—15,0	—18,7
1729	id.	—12,2	—15,3
1742	10 janvier	—13,6	—17,0
1748	id.	—12,3	—15,3
1754	8 janvier	—11,3	—14,1

Maximum du froid.

DATES.		TEMPÉRATURES.	
Années.	Mois.	Deg. Réaumur.	Deg. centig.
1765	8 janvier	-12,5	-10,6
1767	id.	-12,3	-10,3
1768	id.	-13,7	-17,1
1771	id.	-10,9	-13,6
1776	29 janvier	-15,3	-19,1
1783	30 décembre	-15,3	-19,1
1788	31 décembre	-17,8	-22,3
1785	25 janvier	-18,8	-23,6
1798	26 décembre	-14,1	-17,6
1820	11 janvier	-11,4	-14,3
1823	14 janvier	-11,7	-14,5

Tableau des plus hautes températures de l'air observées en divers climats.

Noms des lieux.	Maximum de la température.	Noms des observateurs.
Équateur	+38,4	Humboldt
Surinam	32,3	
Oasis de Mourzouk	54	Ritchie et Lyon.
Pondichéry	44,7	Le Gentil.
Madras	40,0	Roxburgh.
Belt-el-Fakih	38,1	Nieburh.
Martinique	35,0	Chauvaton.
Manille	43,7	Le Gentil.
Antougil (Madagascar)	45,0	Id.
Gundeloupe	38,4	Le Gaux.
Vera-Cruz	35,6	Orto.
Ile de France	32,6	Cossigny.
Philæ (Égypte)	43,1	Coutelle.
Le Caire	40,2	Id.
Bassora	45,3	Beauchamp.
Paramatta (Nouv. Holl.)	41,1	Général Brishrane.
Cap de Bonne-Espérance	43,7	La Caille.
Vienne (Autriche)	35,9	Broquin.
Strasbourg	35,9	Herrenschneider
Paris	38,4	
Varsovie	33,8	Deljue.
Franeker (Holl.)	34,9	Van Swinden
Copenhague	33,7	Bugge.
Nain-Labrador	27,8	De la Trobe.
Stockholm	34,4	Ronnoss.
Petersbourg	30,6	Euler.
Abo	34,2	Lèche.
Islande (Eyafjord)	20,9	Van Seecks.
Hindöen (Norwège)	25,0	Schytte.
Ile Melville	15,0	Parry.

Températures à diverses profondeurs au-dessous du sol.

042. De l'existence d'une couche invariable, située à une certaine profondeur au-dessous du sol, et dans laquelle la température reste la même depuis des siècles. Dès 1671 Cassini avait reconnu que la température des caves de l'Observatoire de Paris n'éprouve aucune variation dans le cours d'une année. En 1730 Lahire avait observé le même fait; mais M. le comte de Cassini, aujourd'hui membre

de l'Académie des sciences, conçut le premier tout ce qu'il y avait d'important dans ce phénomène remarquable; en 1771, il commença quelques séries d'expériences pour l'étudier, et, le 4 juillet 1783, il établit enfin dans les caves de l'Observatoire, de concert avec Lavoisier, un appareil très sensible qui devait donner des résultats décisifs. Cet appareil, conservé et réparé par les soins de M. Bouvard, n'a éprouvé aucun changement depuis plus de trente-deux ans. Il est disposé de la manière suivante :

Sur le sol des caves, à 83 pieds au-dessous du pavé de l'Observatoire, s'élève un massif en pierre de 4 pieds de hauteur portant un grand vase en verre v'v' (Fig. 774), de 18 pouces de hauteur sur 12 à 15 pouces de diamètre. C'est dans ce vase rempli de sable très fin qu'est ajusté le thermomètre v'v'. Son échelle n°1 est en verre; elle est maintenant dans un cadre en cuivre, qui est lui-même fixé sur les parois de la cloche au moyen des traverses s, s', s'', et des agrafes o et n°. Ce thermomètre a été construit autrefois par Lavoisier, avec du mercure bien purifié; la boule a environ 2 pouces et demi de diamètre; le tube est très fin; un degré occupe sur sa longueur 42 ou 43 lignes. Ainsi l'on peut aisément apprécier les centièmes de degré qui occupent encore les 3/4 d'un millimètre environ. Comme ce thermomètre ne marque que 15 ou 16° au-dessus de 0°, un a ménagé au-dessus de la tige en a un petit réservoir pour recueillir l'excédant du mercure si la température venait à s'élever au-dessus de 16°.

Les anciennes observations de M. Cassini et les observations assidues faites depuis trente-deux ans par M. Bouvard, montrent avec évidence que depuis plus de cinquante ans la température des caves de l'Observatoire est parfaitement constante, et égale à 11°, 82. Car dans toute cette période le thermomètre n'a pas varié de 28 centièmes de degrés au-dessus ou au-dessous de 11°, 82, et l'on a reconnu, depuis, qu'un courant d'air accidentellement établi dans les souterrains par les travaux des carrières de Paris, avait été la cause bien probable de ces oscillations.

Paris est le seul lieu de la terre pour lequel on ait une aussi belle série d'observations exactes et non interrompues pendant plus d'un demi-siècle; mais un phénomène qui se soutient avec une telle régularité ne peut pas être un phénomène accidentel, et nous en concluons que dans tous les lieux, il existe à une certaine profondeur au-dessous du sol, un point dont la température reste constante avec les années, quelles que soient les variations extrêmes qui se développent et qui se succèdent à la surface du sol.

La série de ces points de température invariable forme autour du globe une surface que nous appellerons *couche invariable*; c'est à cette couche que viennent s'éteindre toutes les variations brusques ou périodiques que la croûte supérieure de la terre

éprouve par les alternatives du jour et de la nuit, par le changement de vent ou par le renouvellement des saisons.

Nous devons remarquer qu'à Paris il y a plus d'un degré de différence entre la température moyenne 10°, 6 et la température de la couche invariable 11°, 82. Malheureusement, faute d'avoir des observations à diverses profondeurs dans d'autres climats, nous ne pouvons rien statuer par l'expérience sur les rapports ou les différences qui existent ailleurs entre ces deux éléments. Nous ne pouvons rien statuer non plus sur la profondeur précise à laquelle il faut descendre pour arriver à la couche invariable; mais la théorie indique que partout la température invariable ne doit que très peu s'écarter de la température moyenne, et elle indique aussi que partout il faut, pour la trouver, descendre à une profondeur de 40, 60 ou 80 pieds.

Ainsi nous sommes conduits à concevoir au-dessous du sol et tout autour de la terre une certaine couche dont chaque point conserve perpétuellement la même température, qui est à peu près la température moyenne du point de la surface, auquel il correspond verticalement; mais en même temps nous devons concevoir que cette couche invariable n'a pas une courbure régulière. Les plaines, les montagnes, les vallées, la nature du sol, les lacs, les mers et mille autres causes, peuvent lui imprimer des sinuosités particulières que l'expérience seule pourra nous révéler un jour.

643. *Du mouvement de la chaleur au-dessous de la couche invariable.* — Entre la surface du sol et la profondeur de 60 ou 80 pieds, l'ou ne connaît qu'un très petit nombre d'observations, et ces observations même n'atteignent en général qu'une petite profondeur. Voici les résultats qui ont été recueillis à Zurich, à Édimbourg et à Strasbourg.

Résultats moyens des observations faites à Zurich par Ott, et continuées pendant quatre ans et demi, à partir de 1763.

Tempér. moyen. de Zurich. . . 8° 8
Temp. du mois le plus chaud. 18, 7
Id. le plus froid. — 2, 9 } Différence 21°, 6

MOIS.	DIVERSES PROFONDEURS							
	auxquelles les thermomètres étaient établis.							
	1/4 pied.	1/2 pied.	1 pied.	2 pieds.	3 pieds.	4 pieds.	8 pieds.	0 pieds.
Janvier. . .	0° 3	0° 5	1° 8	2° 5	3° 0	4° 8	7° 0	
Février. . .	— 0, 8	0, 2	1, 5	2, 3	2, 8	4, 6	6, 8	
Mars. . .	7, 7	6, 9	5, 0	4, 5	4, 9	5, 0	5, 8	
Avril. . .	11, 7	8, 8	8, 8	8, 1	8, 1	7, 2	7, 2	
Mai. . .	15, 8	15, 2	15, 2	11, 7	11, 8	11, 4	10, 10	
Juin. . .	19, 4	16, 1	15, 1	15, 0	15, 6	15, 2	11, 7	
Juillet. . .	19, 5	17, 7	17, 6	18, 1	18, 1	15, 1	15, 8	
Août. . .	17, 8	17, 2	18, 6	18, 6	18, 5	16, 1	15, 2	
Septembre. . .	15, 0	16, 4	15, 0	15, 1	15, 5	15, 2	15, 2	
Octobre. . .	10, 8	10, 4	10, 8	10, 8	11, 7	12, 0	11, 4	
Novembre. . .	5, 0	5, 8	8, 1	8, 0	8, 5	8, 0	11, 8	
Décembre. . .	2, 2	2, 0	2, 7	4, 0	5, 0	7, 2	8, 4	
Moyenne. . .	10 4	8 5	8 4	8 4	8 7	10 1	10 8	

Maximums et minimums moyens.

Profondeurs.	Maximum.	Minimum.	Différence ou variation moyenne.
1/4 de pied.	19,5 Juillet	— 0,8 Février	20,0
1/2	17,7 id.	0,2 id.	17,5
1	16,6 Août.	1,5 id.	15,1
2	16,1 id.	2,3 id.	13,8
3	10,3 id.	2,8 id.	13,5
4	16,1 id.	4,4 id.	11,7
6	15,2 Septembre	5,5 id.	9,7

Résultat moyen des observations faites à Édimbourg par H. FRANKSON, pendant les années 1816 et 1817.

Tempér. moyen. d'Édimbourg. 8° 8
Tempér. du mois le plus chaud. 15 2 } Différence 11° 7
Id. le plus froid. 3 5 }

MOIS.	1816.				1817.			
	1 pied.	2 pieds.	4 pieds.	8 pieds.	1 pied.	2 pieds.	4 pieds.	8 pieds.
Janvier. . .	0° 8	2° 2	4° 8	6° 1	2° 7	5° 7	8° 7	7° 8
Février. . .	0, 8	2, 2	3, 8	5, 0	2, 8	4, 6	5, 4	5, 8
Mars. . .	1, 7	2, 8	4, 2	5, 7	4, 1	6, 6	5, 4	5, 8
Avril. . .	4, 3	5, 6	5, 2	6, 6	7, 2	5, 8	5, 8	5, 8
Mai. . .	5, 7	8, 5	6, 3	8, 7	8, 2	7, 0	7, 0	8, 8
Juin. . .	10, 9	10, 0	8, 1	7, 7	10, 8	9, 7	8, 7	8, 8
Juillet. . .	12, 7	11, 4	10, 2	8, 7	12, 7	12, 8	10, 8	9, 8
Août. . .	10, 0	11, 0	10, 5	8, 7	11, 9	12, 2	11, 1	10, 4
Septembre. . .	10, 9	10, 7	11, 0	10, 0	11, 7	11, 5	11, 1	10, 4
Octobre. . .	8, 5	8, 8	8, 6	8, 8	7, 8	9, 7	7, 2	9, 8
Novembre. . .	4, 8	6, 8	7, 8	7, 6	8, 0	7, 0	7, 5	8, 7
Décembre. . .	2, 1	4, 4	6, 1	7, 8	3, 5	8, 8	8, 1	8, 1
Moyenne. . .	6 1	8 8	7 8	7 7	7 3	7 8	7 8	8, 1

Maximums et minimums absolus.

Profondeurs.	Maximum.	Minimum.	Différence ou variation absolue.
1816.			
1	12,2 21 juillet	0,6 0 février	11,6
2	11,7 24 id.	2,2 4 id.	9,5
4	11,1 1 ^{re} août	3,9 11 id.	7,2
8	10,0 14 septembre	5,6 18 id.	4,4
1817.			
1	13,3 5 juillet	1,1 0 janvier	12,2
2	13,3 10 id.	3,3 id.	10,7
4	11,1 août	4,4 3 février	6,7
8	10,6 20 septembre	5,8 11 id.	4,8

Résultats moyens des observations faites à Strasbourg par M. HERMANN, pendant les années 1821, 1822 et 1823, avec un thermomètre établi à 15 pieds de profondeur.

Tempér. moyen. de Strasbourg. 9,7
Id. du mois le plus chaud. 17,0 } Différence 10
Id. le plus froid. — 2,0 }

Mois.	1821.	1822.	1823.
Janvier	7,18	8,01	6,60
Février	5,62	8,12	6,73
Mars	7,57	8,43	7,35
Avril	7,50	9,00	7,97

Mois.	1821.	1822.	1823.
Mai	7,96	9,85	9,37
Juin	20,20	10,75	10,93
Juillet	9,68	11,25	10,68
Août	10,77	12,08	11,50
Septembre	11,25	12,18	11,25
Octobre	11,09	11,43	10,93
Novembre	10,47	10,00	9,37
Décembre	9,83	7,35	9,53
Moyennes	9,01	9,94	9,34

En disant tous les résultats précédents et quelques autres encore que nous n'avons pas rapportés, on est conduit aux conséquences suivantes qui paraissent s'appliquer à tous les continents de l'hémisphère boréal.

1° Au mois d'août la température de la terre va en décroissant d'une manière à peu près uniforme depuis la surface du sol jusqu'à la couche invariable;

2° Pendant le mois de septembre la température est à peu près uniforme depuis la surface du sol jusqu'à la profondeur de 16 ou 20 pieds; plus bas elle se décroît un peu et lentement jusqu'à la couche invariable;

3° Pendant les mois d'octobre et de novembre la température va en croissant, depuis la surface du sol jusqu'à une profondeur de 15 ou 20 pieds; plus bas elle se trouve à peu près égale à la température de la couche invariable;

4° Pendant les mois de décembre, de janvier et de février, la température va en croissant d'une manière à peu près uniforme, depuis la surface du sol jusqu'à la couche invariable;

5° Pendant les mois de mars et d'avril, la température va en décroissant très rapidement jusqu'à la profondeur d'un ou deux pieds; plus bas elle décroît moins vite, et finit par devenir croissante;

6° Pendant les mois de mai, juin et juillet, la température est encore décroissante, mais moins rapidement et jusqu'à une profondeur plus grande; puis elle redevient encore un peu croissante pour regagner la température de la couche invariable.

Ainsi *vv'* (Fig. 775) étant la verticale d'un lieu, si l'on considère au-dessous de la surface *v* des points *r*, *r'*, *r''*, etc., placés à diverses profondeurs et que l'on représente par des lignes telles que *ra*, *r'a*, *r''a*, etc., les excès de température que ces points ont au mois d'août sur la température moyenne du lieu, la ligne formée par les points *a*, *a'*, *a''*, etc., sera à peu près une ligne droite qui ne commencera à s'infléchir qu'à une grande profondeur; de même les lignes *rr*, *r'r'*, *r''r'*, etc., représentant les abaissés des températures que les points *r*, *r'*, *r''*, etc., ont au mois de février au-dessous de la température moyenne du lieu, la ligne formée par les points *r*, *r'*, *r''*, etc., formera une ligne sensiblement droite qui ne s'infléchira qu'à une grande profondeur. Ces deux lignes se rapprochent à mesure que la profondeur augmente, et les distances *ra*, *r'a*, etc., de leurs points correspondants font voir aux yeux comment les oscillations de température diminuent à mesure que l'on s'enfonce.

Par exemple, à Zurich la différence entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid, qui est à la surface de 21°, 6, n'est plus que de 15° à 1 pied seulement, et de 9°, 7 à 6 pieds.

On pourra remarquer que Zurich et Édimbourg ont la même température moyenne, et que cependant la marche des thermomètres enfoncés dans le sol est très différente à profondeur égale; cela tient sans doute à une foule de causes, parmi lesquelles on peut mettre en première ligne la nature du climat et celle du sol. Dans les climats excessifs, les températures conserveront, sous le sol, quelque chose de la grande inégalité qu'elles ont à la surface; et le sol lui-même pourra modifier cette influence par la conductibilité et surtout par la facilité plus ou moins grande avec laquelle il laissera filtrer les eaux.

Au reste dans quelques années nous aurons des éléments plus précis pour discuter ces questions importantes; sur plusieurs points de la France et de l'Allemagne, on a commencé des séries d'expériences avec des thermomètres disposés à des profondeurs croissantes. M. Arago en a placé dans les jardins de l'Observatoire de Paris, qui descendent jusqu'à 25 pieds: ces thermomètres sont nécessairement à alcool, à cause de la pression; le réservoir en est cylindrique et de grandes dimensions; le tube est très fin dans toute sa longueur, excepté à l'endroit où il sort de terre: là il devient plus large pour faciliter les observations; les centièmes du degré peuvent s'apprécier aisément.

Le sol dans ses couches superficielles, depuis quelques lignes jusqu'à un pouce de profondeur, a toujours une température très différente de celle de l'air. Sa nature chimique, son état d'aggrégation, ses facultés conductrices et rayonnantes, son humidité ou sa sécheresse sont autant de causes qui modifient les degrés de chaleur ou de froid qu'il acquiert le jour et la nuit. Ces causes sont si nombreuses et si variables qu'il est difficile d'en faire l'analyse ou même d'en étudier les effets par l'expérience, pour les soumettre ensuite à quelques lois générales. Mais on peut dire cependant que la surface du sol prend ordinairement pendant le jour des températures beaucoup plus hautes que la température de l'air et pendant la nuit des températures beaucoup plus basses. Dans nos climats il n'est pas rare de trouver le sol à 50° pendant les chaleurs de l'été, et je l'ai vu une fois à 65° dans un jardin à Paris en 1824; il arrive aussi très souvent que pendant la nuit il tombe à 8 ou 10° au-dessous de la température de l'air, et dans les beaux jours d'hiver on peut observer des différences encore plus grandes.

644. De la température à de grandes profondeurs.

Plusieurs observateurs avaient autrefois reconnu que dans les profondeurs des mines on éprouve une chaleur sensible; mais à cette époque on mettait beaucoup plus d'empressement à expliquer les faits

qu'à les observer. On expliquait donc cette chaleur souterraine avant d'en avoir constaté l'existence d'une manière précise, et on l'expliquait diversement : les uns comme Boyle, l'attribuaient à la décomposition des pyrites, ou plutôt à des espèces de fermentations, auxquelles on avait si souvent recours pour expliquer les faits embarrassés ; les autres la regardaient comme une confirmation ou une conséquence de la fameuse hypothèse du *feu central*, qui avait été imaginée dans les temps les plus reculés, et qui était tour à tour adoptée ou rejetée par les philosophes et par les physiciens. Mais quand l'esprit de doute et d'examen eut succédé à l'esprit systématique, quand on en fut venu à chercher la vérité par la voie des données expérimentales et non plus par la voie des subtilités logiques, on comprit que l'existence ou la non existence de la chaleur souterraine était l'une des plus grandes questions que la physique pût se proposer, et que pour la résoudre une observation thermométrique serait plus efficace que les plus éloquentes dissertations. Gensanne paraît être le premier observateur qui ait porté le thermomètre à des profondeurs graduellement croissantes, et qui ait découvert ce fait important : *que la température augmente avec la profondeur*. Ces expériences remontent à l'année 1740 : elles furent faites dans les mines de plomb de Giromagny, à trois lieues de Belfort ; voici les résultats :

Profondeurs.	Températures.
à 101 mètres	12,5 centigrades
206	13,1
308	10,0
433	22,7

En 1785, de Saussure fit des expériences analogues dans le caaton de Berne. Un gentilhomme saxon, qui s'était fait une théorie particulière sur les salines, avait autrefois décidé la république de Berne à creuser un puits d'une très grande profondeur, affirmant qu'au fond de ce puits on trouverait une confirmation de ses idées. Le puits fut en effet creusé jusqu'à près de sept cents pieds ; on y commença même quelques galeries latérales, mais comme on ne voyait paraître ni sel en masse ni sources salées, la république abandonna l'ouvrage sans vouloir pousser plus loin l'expérience. C'est dans ces galeries, depuis long-temps abandonnées, que de Saussure trouva les températures suivantes :

Profondeurs.	Températures.
à 108 mètres	14,4 centigrades
183	15,6
220	17,4

En 1791, M. de Humboldt fit aussi de nombreuses séries d'expériences dans les mines de Freyberg, avec M. Freisleben. En 1802, M. Daubuisson redonna une nouvelle vie à cette question fondamentale, et depuis cette époque les observations se sont multipliées dans les principales mines de l'Europe, en France, en Allemagne et en Angleterre, tandis que M. de Humboldt, parti en 1796

pour son mémorable voyage, scrutait les températures des mines de l'Amérique jusqu'à une profondeur de 522 mètres.

M. Cordier a publié, en 1827, un mémoire remarquable sur la température de la terre (*Mémoires du Muséum d'histoire naturelle*) ; ses propres recherches s'y trouvent réunies à celles qui avaient été faites avant lui, et nous lui empruntons le tableau suivant, qui contient tous les principaux résultats jusqu'à présent connus.

Tableau des températures observées à diverses profondeurs.

LIEUX, AUTEURS ET DATES	Profondeurs des stations en mètres.	TEMPÉRATURES			Profondeurs correspondantes à l'accroissement de 1° de chaleur.
		à la surface	à une profondeur de 100 mètres	à une profondeur de 200 mètres	
DANS LES PUISSONS DES MINES.					
<i>Cornwallis.</i> — <i>W. Fez.</i> — <i>Fabius</i> en 1823.	Mètres	Degr.	Degr.	Métr.	
Mines de cuivre de South-West-Towson.	82,5	15,6	10	10,7	
M. de cuivre et étain de West-Lofty-Wood	157,4	17,8	10	20,2	
Id. de Faldio	263,5	24,7	10	16,8	
M. de cuivre de Gwentnap.	274,5	24,7	10	19	
<i>Donaire.</i> — <i>W. Fez.</i> — <i>Fabius</i> en 1823.					
Id. de East-Lozomb	150	17,8	10	19,2	
M. de plomb de Beerdston	219,6	19,2	10	23,9	
M. de West-Friendship	311,1	18	10	28,9	
<i>Saline.</i> — <i>De Saussure.</i> — <i>De printemps</i> de 1785.					
M. de sel de Ber.	220	17,4	9	26,2	
<i>Erteque.</i> — <i>Dupuisson.</i> — 5 septembre 1806.					
M. de plomb et d'argent de Poul-louen.	162	16,2	11,5	32,6	
	150	15,5	11,5	75	
DANS LES ROCAUX DES MINES.					
<i>Saxe.</i> — <i>Dupuisson.</i> — <i>Fin de l'hiver</i> de 1802.					
M. de plomb et d'argent de Jungbo-berke	78	9,4	8	20,7	
M. de plomb et d'argent	217	12,5	8	28,2	
Id. de Escherberg.	236	12,8	8	26,2	
Id. de Himmelfahrt.	274	10,4	8	25	
<i>Erteque.</i> — <i>Dupuisson.</i> — 5 septembre 1806.					
	59	11,9	11,5	97,5	
Id. de Poul-louen.	75	11,9	11,5	187,5	
	150	11,8	11,5	26,2	
	80	12,3	11	30	
	80	12,3	11	20	
Id. de Himmelfahrt.	120	12,3	11	24	
	250	10,7	11	26,4	
<i>Cornwallis.</i> — <i>W. Fez.</i> — <i>Fabius</i> en 1823.					
M. de cuivre de Dolcoth.	250	17,6	10	24,6	
<i>Mexique.</i> — <i>De Humboldt.</i>					
M. d'argent de Guanajuato.	522	24,6	16	25,1	

Suite du tableau précédent.

DANS L'ÉTAT DES MINES PRODIGEUSES.				
Localités. — IV. — Foy. — Observations publiées en 1872.	Mètres	Degrés	Degrés	Mètres.
M. de cuivre de North-Hall-Virgin (inondation très prof.)	71,5	15,6	10	42,75
Id. de Nangles (inondation très profonde)	161	15,4	10	34,6
Id. de Greenap (inondation profonde de 128 mètres)	183	15,6	10	32,7
M. de Tingtung (inondation presque égale, n'ayant plus que 16 mètres de profondeur)	196	17,5	10	26,1
M. de cuivre de Huel-Moët (inondation en égouttement, et n'ayant plus que 35 mètres de profondeur)	230,6	15,6	10	41,2
M. de cuivre et étain de Lincolnton (inondation en égouttement, n'ayant plus que 18 mètres de profondeur)	230,6	17,2	10	32
M. d'étain d'United Mines (inondation profonde de 35 mètres)	329,4	28,7	0	20
Saxe. — Daulsdorf. — Fin de l'hiver de 1807.				
M. de plomb et argent de Junghe-Bek (grande inondation profonde de 36 mètres)	318,2	17,2	8	34,25
Bretagne. — Daulsdorf. — 5 septembre 1806.				
Id. de Huelgoët (inondation profonde de 18 mètres)	238	16,5	11	43,5
DANS LE ROC DES MINES.				
Saxe. — De Triebitz. — 1805, 1806, 1807.				
M. de plomb et argent de Bouchert Glück.	180	11,25	8	55,38
	260	15	8	37,1
Saxe. — De Triebitz. — 1813.				
	71,9	8,75	8	95,88
	168,2	11,81	8	35
	328,2	15	8	38,3
	379,54	18,75	8	35,5
Cornouailles. — IV. — Foy. — Publiées en 1871.				
M. de cuivre dite united mines.	358	30,6	0	16,7
	366	31,1	10	16,6
Cornouailles. — IV. — Foy. — Publiées en 1872.				
M. de cuivre de Dolan.	421	34,2	10	20

	Profondeur des stations	Température observée.	Moyenne du pays.
--	-------------------------	-----------------------	------------------

DANS L'ÉTAT DES MINES PRODIGEUSES, FIN DE L'HIVER, DE 1877.

Cornouailles.			
Eau du puits Veric.	Mètres.	Degrés.	11
Eau du puits de Bigorre.	6,2	12,9	
Eau du fond de la mine du Rasin.	11,5	13,13	
Roc au fond de la mine de Castillon.	181,9	17,1	
	195	19,5	
Ligny.			
Roc au fond de la mine Saint-Charles.	99	16,155	11
Dolom.			
Eau du puits Pélisson.	8,8	11,4	11
Eau du puits des Perillous.	16,9	11,77	
Roc au fond de la Station supérieure.	107	17,78	
mine Jacobs Station inférieure.	171	22,1	

DANS LE PAYS DES MINES PRODIGEUSES, FIN DE L'HIVER, DE 1877.

Dans la formation jurassique à peu de distance de la mer.	105	16,25	11,7
---	-----	-------	------

Voici maintenant les principales conséquences que l'on peut tirer de ces résultats :

1^o. Au-dessous de la couche invariable où toutes les oscillations du thermomètre de la surface viennent s'éteindre tout-à-fait après un affaiblissement graduel, les températures restent parfaitement constantes à toutes les profondeurs, sans éprouver la moindre variation pendant des années.

Cette conséquence est justifiée par toutes les observations qui ont été faites au même lieu à différentes époques, et par les observations sédentaires qui ont été continuées dans quelques mines de Saxe pendant plusieurs années avec toutes les précautions convenables (*Ann. de phys. et de chim.*, t. XIII, pag. 211).

2^o. Dans tous les lieux où l'on a fait des observations au-dessous de la couche invariable, on a trouvé, sans aucune exception, des températures qui vont en croissant avec la profondeur.

Nous ne pouvons pas regarder comme une exception la température de 11^o que Guettart avait trouvée en 1782 dans les mines de sel de Wieliczka, à 100 mètres comme à 170 mètres, parce que ces observations n'avaient pas été faites avec assez de soins.

3^o. Si l'on cherche à exprimer la loi suivant laquelle la température augmente avec la profondeur, on trouve des résultats très différents pour les différentes localités.

On trouve, par exemple, que, pour obtenir un accroissement de 1^o dans la température, il faut s'enfoncer,

En France,

d'environ	15 mètres à Decize,
	19 à Littry,
	28 à l'Observatoire de Paris,
	35 à Carmaux,
	40 en Bretagne.

En Suisse,

d'environ 26 mètres près de Bex.

En Saxe,

d'environ 40 mètres pour la moyenne de diverses mines.

En Angleterre,

d'environ 26 mètres en Cornouailles et en Devonshire.

En Amérique,

d'environ 25 mètres à Guanaxato.

Ainsi, en général, on peut dire approximativement que pour obtenir un degré d'accroissement dans la température il faut descendre de 25 à 30 mètres au-dessous du sol; mais les irrégularités que l'on observe au-dessus ou au-dessous de cette espèce de terme moyen n'ont rien de surprenant, lorsque l'on songe à toutes les causes qui peuvent modifier la distribution de la chaleur dans les diverses couches de l'écorce du globe.

Après avoir rapporté les principales expériences qui constatent d'une manière irrévocable le fait de l'accroissement de température au-dessous de la couche invariable, il nous reste à jeter un coup d'œil sur les diverses causes qui ont pu le produire.

Il est évident d'abord que la chaleur développée par la présence des ouvriers et par la combustion des lampes qui éclairaient les travaux n'est pas suffisante pour déterminer cet accroissement de température; car on l'observe dans les travaux depuis long-temps abandonnés, on l'observe dans les sources les plus abondantes qui jaillissent au fond des mines, et on l'observe enfin toujours d'autant plus grand que la profondeur elle-même est plus grande. Au reste M. Cordier a supputé, d'après des données connues, l'influence possible de ces diverses causes et celles des courans d'air qui sont établis dans les mines pendant les diverses saisons de l'année, et il résulte de ses calculs que toutes les causes accidentelles réunies pourraient bien, entre certaines limites très étroites, faire osciller les températures souterraines, mais qu'elles ne pourraient ni les produire ni les maintenir telles qu'on les observe.

Les causes accidentelles une fois écartées, nous n'avons plus qu'à choisir entre trois causes générales, dont il est impossible aujourd'hui de démontrer la justesse ou la fausseté.

On peut dire, 1^o que l'accroissement de température résulte des actions beaucoup plus énergiques que le soleil a autrefois exercées sur le globe de la terre; 2^o qu'il résulte des combinaisons chimiques, qui ne cessent de s'effectuer à une profondeur plus ou moins grande, et dont les volcans sont la preuve évidente; 3^o enfin qu'il résulte d'un feu central, comme disaient les anciens, ou plutôt d'une chaleur primitive que la terre aurait reçue à son origine, et qui se serait conservée à de grandes profondeurs, tout en se dissipant dans les couches superficielles, suivant des lois déterminées.

La première opinion est peu probable, à moins qu'on ne la fasse rentrer dans la troisième; car le grand nombre de volcans qui couvrent la terre attestent l'existence d'une cause universelle, capable d'élever au plus haut degré de chaleur des masses de matière effrayantes par leur étendue. Si l'on attribue cette chaleur à une action du soleil qui se serait autrefois exercée avec une énergie incomparablement plus grande qu'aujourd'hui, on admet le feu central, seulement on l'explique en l'admettant. Au contraire, si l'on attribue la chaleur des volcans aux actions chimiques, ce n'est pas la peine de recourir à une autre hypothèse pour expliquer 8 ou 10^e d'accroissement de température

que l'on observe dans les couches profondes sur lesquelles on a expérimenté.

Tout se réduit donc aux deux opinions, de la chaleur chimique et de la chaleur primitive, entre lesquelles je ne trouve jusqu'à présent aucune raison décisive de préférence. Cependant s'il n'y a pas d'objection solide contre la chaleur chimique, il y a du moins quelques raisons de plus en faveur de la chaleur primitive. Car la terre, quelle que soit son origine, a dû avoir primitivement une température déterminée dans ses différentes couches; son noyau central devait être chaud ou froid; or il n'y a aucune raison de supposer qu'il ait été froid d'abord, pour être ensuite réchauffé par des actions chimiques, plutôt que de supposer qu'il a été chaud primitivement et que la matière s'est ensuite agrégée à l'intérieur et refroidie à l'extérieur, conformément aux lois immuables qui lui ont été imposées.

Température à diverses hauteurs au-dessus du sol.

645. *Observations thermométriques faites à diverses hauteurs.*

Tout le monde sait que la température décroît à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère: on en voit une preuve assez frappante dans les neiges éternelles qui couvrent les hautes montagnes, comme les Alpes et les Pyrénées dans nos climats tempérés, le Chimborazo et les volcans de Cotopaxi et d'Antisana, sous la zone torride, presque immédiatement sous la ligne équinoxiale. Les physiciens ont cherché depuis long-temps et la loi de ce décroissement et la cause à laquelle on doit l'attribuer; pour procéder ici d'après notre méthode ordinaire, nous rapporterons d'abord les principales observations qui ont été faites sur ce sujet, soit en Europe, soit dans la zone équatoriale.

Dans le tableau suivant, la première colonne indique les différentes stations qui ont été comparées deux à deux et au même instant; la station supérieure est toujours exprimée la première;

La deuxième colonne indique les températures correspondantes aux deux stations;

La troisième colonne contient l'excès de température de la station inférieure sur la station supérieure;

La quatrième colonne est la distance verticale des deux stations;

Et la cinquième colonne enfin indique de combien de mètres il faut s'élever pour trouver un abaissement de température de 1^o; elle a été calculée en supposant que le décroissement de température est proportionnel à la hauteur.

Tableau du décroissement de température observé à diverses hauteurs.

	Température au sol ou à l'altitude indiquée.	Déclivité des hauteurs, en mètres, entre les stations.	Déclivité des hauteurs, en mètres, entre les stations.	Hauteur en mètres pour un degré de différence.
1. <i>Arévalo de Gay-Lussac.</i>	— 0,5	40,5	6979	170
2. <i>Paris.</i>	— 0,8	40,5	6979	170
3. <i>Chimborazo.</i>	— 1,6	36,9	5879	219
4. <i>Mer du sud.</i>	— 2,3	31,2	4374	140
5. <i>Mont-Blanc.</i>	— 2,9	91,2	4374	140
6. <i>Gravet, à midi.</i>	— 28,5	29,2	—	150
7. <i>Mont-Blanc.</i>	— 27,6	29,2	—	150
8. <i>Gravet, à 2 heures soir.</i>	— 28,5	29,2	—	150
9. <i>Pic de Ténier.</i>	— 28,5	29,2	—	150
10. <i>Oratava (Cordier).</i>	— 2,9	33,9	9729	236
11. <i>Mont-Blanc.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
12. <i>Chamonix, à midi.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
13. <i>Id., à 2 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
14. <i>Id., à 4 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
15. <i>Id., à 6 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
16. <i>Id., à 8 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
17. <i>Id., à 10 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
18. <i>Id., à 12 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
19. <i>Id., à 14 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
20. <i>Id., à 16 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
21. <i>Id., à 18 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
22. <i>Id., à 20 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
23. <i>Id., à 22 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
24. <i>Id., à 24 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
25. <i>Id., à 26 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
26. <i>Id., à 28 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
27. <i>Id., à 30 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
28. <i>Id., à 32 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
29. <i>Id., à 34 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
30. <i>Id., à 36 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
31. <i>Id., à 38 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
32. <i>Id., à 40 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
33. <i>Id., à 42 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
34. <i>Id., à 44 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
35. <i>Id., à 46 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
36. <i>Id., à 48 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
37. <i>Id., à 50 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
38. <i>Id., à 52 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
39. <i>Id., à 54 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
40. <i>Id., à 56 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
41. <i>Id., à 58 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
42. <i>Id., à 60 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
43. <i>Id., à 62 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
44. <i>Id., à 64 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
45. <i>Id., à 66 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
46. <i>Id., à 68 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
47. <i>Id., à 70 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
48. <i>Id., à 72 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
49. <i>Id., à 74 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
50. <i>Id., à 76 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
51. <i>Id., à 78 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
52. <i>Id., à 80 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
53. <i>Id., à 82 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
54. <i>Id., à 84 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
55. <i>Id., à 86 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
56. <i>Id., à 88 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
57. <i>Id., à 90 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
58. <i>Id., à 92 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
59. <i>Id., à 94 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
60. <i>Id., à 96 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
61. <i>Id., à 98 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
62. <i>Id., à 100 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
63. <i>Id., à 102 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
64. <i>Id., à 104 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
65. <i>Id., à 106 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
66. <i>Id., à 108 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
67. <i>Id., à 110 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
68. <i>Id., à 112 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
69. <i>Id., à 114 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
70. <i>Id., à 116 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
71. <i>Id., à 118 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
72. <i>Id., à 120 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
73. <i>Id., à 122 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
74. <i>Id., à 124 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
75. <i>Id., à 126 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
76. <i>Id., à 128 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
77. <i>Id., à 130 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
78. <i>Id., à 132 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
79. <i>Id., à 134 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
80. <i>Id., à 136 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
81. <i>Id., à 138 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
82. <i>Id., à 140 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
83. <i>Id., à 142 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
84. <i>Id., à 144 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
85. <i>Id., à 146 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
86. <i>Id., à 148 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
87. <i>Id., à 150 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
88. <i>Id., à 152 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
89. <i>Id., à 154 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
90. <i>Id., à 156 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
91. <i>Id., à 158 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
92. <i>Id., à 160 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
93. <i>Id., à 162 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
94. <i>Id., à 164 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
95. <i>Id., à 166 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
96. <i>Id., à 168 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
97. <i>Id., à 170 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
98. <i>Id., à 172 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
99. <i>Id., à 174 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236
100. <i>Id., à 176 heures soir.</i>	— 2,9	33,9	9729	236

Déclivement moyen d'après les 36 observations. 161,7

Ce tableau fait voir d'une manière évidente le fait du décroissement de température, et en jetant les yeux sur la cinquième colonne on remarque que ce décroissement a lieu d'une manière très irrégulière : dans la trente-quatrième observation, 111 mètres d'élévation ont donné 1° d'abaissement dans le thermomètre, tandis que dans la dix-huitième il a fallu 249 mètres; ce sont les deux observations extrêmes, l'une donne le décroissement le plus rapide, et l'autre le plus lent. En prenant la moyenne entre tous les résultats, on trouve 1° d'abaissement pour 165 mètres d'élévation. Mais cette moyenne n'est qu'une approximation qui change avec les vents et les saisons, puisqu'au même lieu, entre Baréges et le pic du Midi, il a fallu une fois 119 mètres, en septembre 1805, et une autre fois 153 mètres, en septembre 1810.

D'autres expériences font voir qu'en général le décroissement n'est pas proportionnel à la hauteur; et lorsque l'on ne considère que des hauteurs très petites, comme 8 ou 10 mètres, on observe des irrégularités singulières qui dépendent de la direction du vent, de la présence ou de l'absence du soleil; il n'est pas rare, par exemple, de voir entre ces limites la température devenir croissante avec la hauteur. Ce phénomène arrive, en général, dans la nuit jusqu'au matin, quand l'air est calme et le ciel serein; c'est un effet du rayonnement. Par la même raison l'on peut s'attendre à trouver quelquefois la température à peu près constante.

M. de Humboldt a fait en Amérique un très grand nombre d'observations, près de l'équateur, dans les Andes de Quito, et vers l'extrémité boréale de la zone torride, dans les Cordillères du Mexique. Il en a tiré les conséquences exprimées dans le tableau suivant.

Hauteur.	Tempér. moyenne.	Différences.
0	27,5	
1000 mètres	21,8	5,7
2000	18,4	3,4
3000	14,3	4,1
4000	7	7,3
5000	1,5	5,5

Ainsi, dans ces régions, sur les flancs de ces montagnes, non moins prodigieuses par leur épaisseur que par leur élévation, le décroissement de la température n'est pas uniforme; on voit qu'il est le plus petit possible entre 1000 et 3000 mètres. Cette couche de l'atmosphère est, sous l'équateur, la région habituelle des nuages; c'est là que les vapeurs, plus ou moins condensées, absorbent en plus grande proportion la chaleur solaire, et l'on ne doit pas s'étonner que cette région soit en effet moins refroidie que celles qui appartiennent à un air plus pur et plus transparent.

Dans les régions polaires, à l'Ingletoick lat., 69° 21', le capitaine Parry a élevé un cerf-volant jusqu'à quatre cents pieds de hauteur avec un

thermomètre *à minima*, sans observer une différence sensible de température; dans cette haute région, le thermomètre marquait 31° au-dessous de zéro, comme sur les glaces de la mer.

On a essayé d'exprimer par une formule générale le décroissement de la température de l'atmosphère. M. Leslie est arrivé à ce résultat remarquable, que la différence de température entre deux stations est, en degrés centigrades, égale à 25 multiplié par la différence qui existe entre le rapport direct et le rapport inverse des hauteurs barométriques appartenant à ces deux stations. Ainsi, on eut la formule

$$n = 25 \left(\frac{n'}{n} - \frac{n''}{n} \right)$$

n est la différence des températures.

n la hauteur du baromètre à la station inférieure.

n' la hauteur du baromètre à la station supérieure.

Cette expression est simple et élégante, mais on doit convenir qu'il est encore plus simple de dire que la température décroît de 1° pour 120, 140, ou 160 mètres; ce sont deux manières inexactes d'exprimer une loi inconnue; car l'expression rigoureuse de cette loi doit renfermer *plusieurs* coefficients variables, dont l'expérience seule peut donner la valeur.

640. *Causes du froid qui règne sur les montagnes et dans les régions élevées de l'atmosphère.*

Nous n'entreprendrons pas de faire ici l'histoire des nombreuses et étranges hypothèses qui ont été faites pour expliquer l'état thermométrique de l'atmosphère et des hautes montagnes; ce sujet s'offrait de lui-même à l'imagination, et, il faut l'avouer, l'imagination l'a traité avec un véritable luxe d'invention; on pourrait même ajouter que les ouvrages les plus récents en retiennent encore quelque chose. Cependant ce phénomène nous paraît très simple: il résulte de quelques propriétés de l'air qui sont maintenant bien connues et bien vérifiées par l'expérience; ces propriétés sont les suivantes:

1°. L'air libre s'échauffe lentement et se refroidit promptement.

2°. L'air chaud s'élève en vertu de sa légèreté spécifique.

3°. L'air qui se dilate prend une capacité plus grande pour la chaleur.

La première de ces propriétés est la seule qui exige ici quelques développemens; les deux autres ont été démontrées dans les chapitres de la dilatation et de la chaleur spécifique.

Pour mieux faire comprendre ce que nous entendons en disant que l'air libre s'échauffe lentement et se refroidit promptement, nous expliquerons d'abord cette propriété dans un autre corps

diaphane, par exemple, dans le verre. Concevons une boule de verre de quelques pouces de diamètre, ayant une température de 300° dans toutes ses parties, et placée au centre d'une enceinte vide dont les parois soient maintenues à la température 0°. Cette boule se refroidira suivant certaines lois très compliquées; mais celles que soient ces lois, nous savons que les molécules centrales se refroidiront *directement*, c'est-à-dire qu'elles convertiront des rayons calorifiques qui, après avoir traversé toute l'épaisseur du verre, traverseront ensuite l'espace vide qui l'enveloppe, et seront absorbés par les parois de l'enceinte. Ainsi les molécules de la surface ne seront pas les seules qui perdent de la chaleur, comme dans les corps *opagues*, et le refroidissement est plus prompt parce qu'il n'a pas lieu seulement de proche en proche.

Faisons maintenant l'expérience inverse: mettons la boule à 0°, au milieu d'une enceinte dont les parois soient maintenues à la température de 300°. Les rayons calorifiques émanés des parois traverseront librement la boule transparente, ils ne seront que très peu absorbés, et en proportion d'autant plus petite que la température des parois sera plus haute; le réchauffement sera donc très lent.

Ainsi, dans les corps qui sont *diaphanes* pour la chaleur, la vitesse de réchauffement peut être incomparablement plus lente que la vitesse de refroidissement.

C'est là précisément ce qui arrive dans l'air de l'atmosphère, car les gaz sont éminemment perméables à la chaleur rayonnante, et, de plus, les rayons de la chaleur solaire sont de tous les rayons calorifiques ceux qui se laissent absorber en moindre proportion par les corps transparents.

Quand le ciel est serein, l'air atmosphérique est traversé librement par la chaleur solaire, et n'en reçoit qu'une très faible élévation de température; quand l'air est brumeux, rempli de vapeurs résineuses ou chargé de nuages, la chaleur solaire est absorbée en très grande proportion, toute la concubescence de l'atmosphère prend une température plus haute, et s'élève en vertu de sa légèreté spécifique; mais en même temps elle se refroidit par deux causes, parce qu'elle se dilate en s'élevant, et parce qu'elle rayonne de toutes parts, et particulièrement vers les régions supérieures du ciel, où, par hypothèse, l'air est resté pur et transparent.

Ainsi au milieu de l'atmosphère l'air pur ne s'échauffe que très peu par la chaleur solaire, et si l'air brumeux a la propriété de s'échauffer sensiblement, il a aussi la propriété de se refroidir promptement.

Cependant si l'air atmosphérique est peu échauffé par le rayonnement, il est vivement échauffé par son contact avec la surface du sol, et il semble d'abord que toute la masse de l'atmosphère doive s'échauffer comme une masse d'eau contenue dans

un vase dont le fond et les parois sont frappés par la flamme. A coup sûr, si le fond d'un lac était échauffé seulement à 30 ou 40° comme l'est à chaque instant la surface du sol, sur le tiers ou le quart de la terre, on verrait bientôt les couches supérieures de ses eaux participer à cette élévation de température. Et tout semble égal, car l'air monte, comme l'eau, en vertu de sa légèreté spécifique. Mais entre l'air et l'eau il y a une différence essentielle : c'est que l'eau conserve une capacité constante pour la chaleur, tandis que l'air augmente de capacité en se dilatant. Ainsi, concevons un pied cube d'air à la surface du sol, ayant, par exemple, 20° de chaleur; supposons qu'il s'élève de 100 pieds, et qu'à cette hauteur les molécules dispersées qui le composaient ne possèdent plus que la température de 15°, il n'en faudra pas conclure que dans la trajet ces molécules ont donné 5° de chaleur par le contact aux autres molécules qu'elles ont rencontrées; car, en passant sous une pression moindre, ce pied cube d'air a pris un volume plus grand, et par cela seul il a absorbé une partie de sa propre chaleur; s'il en a absorbé, par exemple, 4°, il n'a pu en donner que 1° au lieu de 5° aux divers molécules qu'il a rencontrées sur sa route. D'une autre part le pied cube qui est descendu pour remplir sa place, s'est comprimé en descendant, et il a dégagé de la chaleur au profit des couches inférieures. Ainsi, d'après les propriétés de l'air et la constitution de l'atmosphère, toutes les causes d'accroissement de température sont renfermées dans les couches inférieures.

Il est facile d'après cela d'analyser les phénomènes qui se produisent sur les flancs et sur les sommets des montagnes.

A 2000 ou 3000 mètres au-dessus du niveau de la mer et des basses plaines continentales, dans les Alpes, les Pyrénées ou les Andes équatoriales, concevons une vallée ou un plateau d'une assez grande étendue.

Sur ces hauteurs l'air étant en général plus pur et moins brumeux que sur les basses terres, les rayons solaires auront en général une plus grande énergie en tombant sur la surface du sol; et si cette cause agissait seule, la température du sol devrait être plus haute qu'en niveau des mers. Mais à cette cause d'échauffement se joint une cause encore plus énergique de refroidissement; car, si la pureté de l'air favorise l'arrivée des rayons solaires, elle favorise aussi et avec bien plus d'efficacité le départ des rayons calorifiques qui sont lancés le jour et surtout la nuit par la pouvoir émissif du sol. Ainsi, en supposant que le vent ne souffle jamais sur les plateaux élevés, on aurait pendant le jour une température peut-être un peu plus haute que dans les plaines, et pendant la nuit une température beaucoup plus basse; ce qui d'annulerait déjà, en dernier résultat, une température moyenne moindre. L'influence des courants d'air et du vent ajoutée encore à cet abaissement. Nous avons vu

qu'à 2000 ou 3000 mètres au-dessus des mers et des plaines, l'air est beaucoup plus froid que dans les couches qui avoisinent le sol; or c'est précisément cet air froid qui baigne sans cesse les plateaux élevés et qui souffle sans cesse sur leur surface. Cette seconde cause d'abaissement de température est en général la plus puissante, et c'est aussi dans les hauts lieux où elle agit avec plus d'intensité, que l'on trouve, proportion gardée, un plus grand degré de froid.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que la masse des montagnes, l'étendue des plateaux, la profondeur des vallées, la direction des pentes, l'humidité du sol, et une foule d'autres circonstances encore, modifient sans cesse l'action du vent et le rayonnement de la nuit, et, par conséquent, la température moyenne à laquelle un lieu donné pourra s'abaisser.

647. *Limites des neiges perpétuelles.* — Nous venons d'examiner les causes du décroissement de température dans l'atmosphère, et, par conséquent, les causes des neiges éternelles qui couvrent les hautes montagnes; il nous reste à discuter maintenant quelles sont, dans les divers climats, les hauteurs auxquelles il faut s'élever pour trouver sur les flancs des montagnes cette limite de séparation entre les cimes toujours neigeuses et les terres qui reçoivent les rayons du soleil, du moins pendant quelques semaines, et qui peuvent produire une végétation plus ou moins active. On avait cru pendant long-temps que là où commencent les neiges éternelles, la température moyenne de l'année est essentiellement la température de la glace fondante; mais M. de Humboldt a démontré par l'expérience qu'il n'en est point ainsi, et les observations de M. Léopold de Buch sur les neiges perpétuelles de la Norvège et de la Laponie ont donné à cette vérité une pleine confirmation. Dans la zone torride, à la limite des neiges, la température moyenne de l'air est de 1° 8 au-dessus de zéro; tandis qu'en Norvège entre 60 et 70° de latitude cette température moyenne s'abaisse à 6° au-dessous de zéro. Il n'est pas difficile de se rendre compte de ce phénomène; car, suivant la remarque de M. de Buch, la limite des neiges dépend surtout de la température des mois les plus chauds de l'année : elle s'élève quand cette température est plus haute et s'abaisse quand cette température est moindre. Or, la température des mois les plus chauds dans un lieu déterminé, dépend de l'état plus ou moins pur ou plus ou moins brumeux de l'atmosphère, de la nature et de l'inclinaison du sol, des vents auxquels il est exposé, etc.; et l'on conçoit que, toutes choses d'ailleurs égales, la limite des neiges sera d'autant plus relevée que la masse des neiges sera elle-même moins étendue.

Un pic de petites dimensions qui prendrait naissance dans une plaine pour s'élever dans les airs jusqu'à la région des neiges, aurait toujours vers son sommet des mois d'été beaucoup plus chauds

qu'un massif énorme, qui, après s'être refroidi pendant l'hiver, peut réagir plus long-temps sur l'air tempéré qui l'enveloppe en été et déterminer au loin un abaissement de température plus ou moins sensible.

Nous avons rassemblé dans le tableau suivant les principales observations qui ont été faites jusqu'à présent sur la limite des neiges perpétuelles, depuis l'équateur jusqu'aux latitudes de 60 à 70°.

Latitude et noms de l'observateur.	Noms des lieux.	Hauteur de la limite des neiges au-dessous du moyen.	Température moyenne.
0 à 10° M. de Humboldt.	Rucupichincha Ruanpichincha Antisana Corazon Cotapaxi Chimborazo	4795 m.	1,5
14 à 19° M. Pentland.	Cordillère orientale du Haut-Péron Cordillère occiden. du Haut-Péron	5200 5130	
19 à 20° M. de Humboldt.	Orisaba Popocatepetl Femme blanche Nevado de toluca	4580	
27 à 36° M. Wehh. . . .	Hymalaya (pente méridionale) Hymalaya (pente septentrionale)	3850 5000	
42 à 43° Engelhardt et Farro.	Caucase	3216	3,5
Ramond.	Pyrénées	2729	
45 à 46° M. Wahlenberg.	Alpes	2670	4
49° 61° M. Léop. de Buch.	Carpathes Pie de Saletind.	2592 1690	6
70° M. Léop. de Buch.	Le Storwans-Field	1060	6

Nous ajouterons ici, d'après M. de Humboldt, quelques considérations sur chacune de ces localités (Mém. de M. de Humboldt sur la limite inférieure des neiges, etc., *Ann. de Phys. et de Chim.*, tom. XIV, pag. 1).

1°. Sous l'équateur, dans le massif prodigieux des Andes, que les Péruviens appellent fastueusement la *Cordillère royale des neiges*, on ne trouve pas d'une cime à l'autre et pour les diverses saisons de l'année, une oscillation de plus de 25 à 30 mètres dans la limite des neiges.

Dans les plaines habitées d'Antisana, qui sont couvertes d'un superbe gazon composé d'herbes aromatiques, il tombe quelquefois, à 4200 mètres de hauteur, trois ou quatre pieds de neige, qui se conservent pendant cinq ou six semaines.

Dans le royaume de Quito on ne voit jamais de neige au-dessous de 3700 mètres, où la température moyenne est d'environ 9°.

La grêle descend plus bas que la neige, à 100 mètres et même à 600 mètres : il en tombe tous les cinq à six ans une fois ; mais il ne paraît pas qu'on en ait jamais vu dans les plaines inférieures.

Il paraît fort douteux qu'en Afrique on trouve près de l'équateur des montagnes assez hautes pour offrir à ces climats le spectacle des neiges éternelles.

2°. L'observation de M. Pentland est très remarquable, puisqu'elle fait voir que, du 14° au 19° degré de latitude australe, la limite des neiges est plus élevée que sous l'équateur lui-même ; il serait important de connaître l'étendue des oscillations annuelles que cette limite peut éprouver, afin d'en déduire l'influence des plateaux et de la configuration du sol.

3°. La limite des neiges ne s'abaisse que de 215 mètres en passant de l'équateur à la latitude de 19 à 20°, c'est-à-dire dans une étendue de 400 lieues.

L'oscillation annuelle des neiges est ici beaucoup plus grande que sous l'équateur ; elle atteint quelquefois jusqu'à 600 ou 700 mètres d'étendue.

A peu près à la même latitude, les îles Sandwich présentent à O-Whyher la cime remarquable de Mowna-Roa, à laquelle on donne plus de 5000 mètres de hauteur ; il serait curieux d'en avoir une mesure exacte, car il paraît bien constant qu'elle est parfois entièrement dépourvue de neiges.

4°. La pente méridionale de l'Hymalaya donne la limite des neiges à peu près à la hauteur que l'on pourrait déduire des observations mexicaines ; mais la pente septentrionale présente un phénomène bien extraordinaire, puisque, d'après les mesures de M. Wehh et les observations qu'il a faites au temple de Kedar-nach et au col de Niti, la limite des neiges s'élèverait à 5000 mètres, c'est-à-dire à une hauteur plus grande que sous l'équateur. C'est assurément dans l'immense étendue des plateaux et dans la configuration du sol qu'il faudrait chercher l'explication de ce phénomène étonnant.

5°. Le Caucase et les Pyrénées sont à la même latitude, et cependant la limite des neiges se trouve au Caucase à plus de 400 mètres plus élevée qu'aux Pyrénées. La température des mois les plus chauds dans ces deux contrées donnerait sans doute des indications précieuses sur la cause de cette différence.

6°. Les observations de M. Léopold de Buch sur cette vaste chaîne qui sépare la Norvège dans toute sa longueur, et qui s'étend depuis le 68° jusqu'au 71° degré de latitude, sont bien propres à montrer l'influence que l'état brumeux de l'atmosphère peut exercer même sur la limite des neiges.

Car on ne peut douter à présent que le relèvement considérable de cette limite jusqu'à 1060 mètres dans ces hautes latitudes, ne soit un

effet de ces circonstances et du voisinage de la mer.

Température des eaux et formation des glaces.

648. *Température des sources.* — Toutes les sources abondantes ont une température qui varie très peu dans les différentes saisons de l'année; pour notre hémisphère, elles atteignent en général leur plus haut degré de chaleur vers le mois de septembre, et leur plus grand degré de froid vers le mois de mars. La différence, pour ces deux époques extrêmes, s'élève à 1 ou 2°. Il était curieux de comparer la température moyenne des sources à la température moyenne de l'air à la surface du sol, où elles arrivent au jour; on trouvera cette comparaison dans le tableau suivant, où nous avons rassemblé les principaux résultats connus.

Tableau comparatif de la température des sources et de la température moyenne de l'air

Noms des lieux.	Tempér. du sol. Degr. centigr.	Différence.	Noms des observateurs.
Congo.	22,7	+ 2,9	Smith.
Cumana.	25,9	+ 2,4	Humboldt.
Saint-Yago (Cap-Vert).	24,0	+ 0,5	Hamilton.
Bockford (Jamaïque).	20,1	+ 0,9	Hunter.
Havane.	23,5	+ 2,1	Ferrer.
Nopal.	23,0	+ 1,5	Hamilton.
Ténériffe.	18,0	+ 3,6	De Boch.
Le Caire.	22,6	0,0	Nour.
Cincinnati.	12,4	0,0	Mansfield.
Philadelphie.	12,7	— 0,3	Warden.
Carmeaux.	13,0	+ 1,4	Cordier.
Genève.	10,4	— 0,8	Wahlenberg.
Zurich.	9,4	— 0,6	Id.
Paris.	11,5	— 0,6	Id.
Berlin.	10,2	— 2,2	Erman fils.
Dublin.	9,6	— 0,1	Kirwan.
Kendal.	8,7	— 0,8	Dalton.
Keswick.	9,3	— 0,3	Id.
Königsberg.	8,1	— 1,9	Erman.
Édimbourg.	8,7	0,0	Playfair.
Carlsrone.	8,5	— 0,7	Wahlenberg.
Upsala.	6,5	— 1,0	Id.
Uméo.	2,9	— 2,1	Id.
Enontekies.	1,3	— 4,9	Id.
Vadsoe.	2,3	— 3,5	Id.

On voit que, dans la zone torride, la température moyenne de l'air est en général un peu plus haute que la température des sources; mais, dans la zone tempérée, c'est le contraire qui arrive; les sources sont plus chaudes que l'air, et leur excès devient en général croissant avec la latitude, tellement qu'à 60° et 70°, d'après les observations très exactes de Wahlenberg, elles l'emportent de 3 ou même 4° centigrades.

Lorsque les sources ne sont pas thermales, leur température est certainement produite par les diverses couches du sol qu'elles ont dû traverser;

mais à cet égard il y a une différence entre les sources très petites et les sources très abondantes : les premières ne peuvent réagir qu'à très faiblement sur les couches qu'elles traversent; elles sont en quelque sorte forcées d'en prendre la température et d'arriver au jour après avoir subi divers degrés de réchauffement ou de refroidissement; au contraire, les sources abondantes arrivent au jour avec la température des couches où elles se sont formées; car si elles rencontrent des couches plus froides, elles les réchauffent; si elles en rencontrent de plus chaudes, elles les refroidissent, et les altérations qu'elles éprouvent elles-mêmes pour produire ces effets sont d'autant moindres que les eaux sont plus abondantes. Ces résultats, indiqués d'avance par la théorie, sont confirmés par les observations qui ont été faites sur les puits artésiens : la température des eaux qu'ils versent à la surface du sol paraît être à peu près exactement la température des nappes profondes dans lesquelles ils prennent leur origine; car cette température est invariable, et se trouve d'autant plus grande que la profondeur du puits est elle-même plus grande. M. Arago, qui a eu l'idée de se servir de ce moyen pour trouver la température de la terre à diverses profondeurs, a recueilli un grand nombre d'observations qui permettent en quelque sorte de juger de la profondeur d'un puits lorsqu'on connaît la température de ses eaux, ou réciproquement de prédire quelle sera la température des eaux lorsqu'on sait à quelle profondeur elles prennent naissance.

Les sources thermales atteignent quelquefois des températures voisines de l'ébullition, et tout ce que l'on sait jusqu'à présent sur le gisement de ces sources ne permet pas de décider si elles tiennent ces hauts degrés de chaleur du la profondeur à laquelle elles prennent naissance, ou si elles les tiennent de quelques circonstances particulières aux couches qu'elles traversent. Pour trancher la difficulté, il ne suffit pas de remarquer que pour plusieurs de ces sources la température est restée constante pendant de longues années, car on peut bien concevoir des actions locales qui ne s'épuisent pas ou même qui ne s'altèrent pas pendant des siècles : les sources salées que l'on exploite en sont un exemple, et si l'on objectait que ces sources viennent peut-être de la mer, et qu'ainsi la cause qui les salue n'est pas une cause locale, on pourrait répondre que cette origine est au moins très contestable, et qu'au reste il existe un grand nombre de sources minérales qui ne viennent certainement pas de la mer, et qui paraissent tenir en dissolution les mêmes éléments, et en même proportion depuis un très grand nombre d'années.

Or, s'il existe des causes locales capables d'introduire dans les eaux, d'une manière invariable et permanente, des éléments qui en modifient la nature, on peut bien admettre aussi qu'il existe des causes locales capables d'en changer la température d'une manière permanente. Nous indiquons

ici ces considérations pour montrer seulement que la question n'est pas résolue, et qu'elle offre un beau et vaste sujet de recherches.

On trouve dans plusieurs lieux du globe, et particulièrement près des volcans en activité, des sources thermales jaillissantes, et d'autres éruptions d'eau ou de gaz qui méritent aussi toute l'attention des météorologistes et des géologues. Il importe d'étudier leur température et leur gisement. Nous citerons ici comme exemple la fameuse source du *Geyser*, en Islande. Le *Geyser* a des éruptions à peu près périodiques; elles sortent d'un vaste bassin qui a environ 70 pieds de profondeur et 60 de diamètre. On entend d'abord un bruit souterrain formidable, et bientôt l'on voit jaillir par l'ouverture du bassin, et jusqu'à la hauteur de 300 pieds au-dessus du sol, d'énormes colonnes d'eau qui entraînent des corps pesans et même des cailloux d'un grand volume (*Fig. 770*). La température de ces eaux est de 82°. Quelquefois les éruptions sont peu nombreuses dans le cours d'une journée; d'autres fois on en compte plusieurs dans une minute.

640. De la température des lacs et des rivières, et de leur congélation. — Dans les lacs, les couches supérieures de l'eau éprouvent des variations de température considérables : on sait qu'en hiver elles peuvent se congeler, et qu'en été elles atteignent des températures de 20 à 25°. Mais ce qui arrive à la surface ne se reproduit pas dans les couches plus profondes; il y a dans ces masses de fluides une distribution de la chaleur qui ne se fait ni par les mêmes causes ni suivant les mêmes lois que dans les solides, et il serait très important de faire des expériences sur ce sujet. De Saussure est, je crois, le premier observateur qui ait abordé cette grande question; il a parcouru la plupart des lacs de la Suisse; il a déterminé leur température à la surface et à diverses profondeurs, et de ses belles expériences est sorti le principe fondamental de l'équilibre de température dans les eaux. Nous rapporterons seulement dans le tableau suivant les résultats qu'il a obtenus à la surface et dans les couches du fond.

Noms des lacs.	Froid à la surface.	Froid au fond.	Profondeur en pieds.
Lac de Genève. . .	5,0	5,4	950
Id.	21,2	6,1	150
— de Thun. . . .	19,0	5,0	350
— de Briens. . .	19,4	4,8	500
— de Lucerne. . .	20,3	4,9	600
— de Constance. .	18,1	4,3	370
— Majur.	25,0	6,7	335
— de Neuchâtel. .	23,1	5,0	325
— de Bienne. . .	20,7	6,9	217
— d'Annecy. . .	14,4	5,6	163
— du Bourget. . .	17,9	5,6	240

Ces expériences ont été faites depuis 1777 à 1784; les températures à la surface sont très différentes,

c'est qu'elles ont été observées à diverses saisons de l'année; mais dans tous les cas la température du fond et celle de la surface sont du même jour et en quelque sorte du même instant. Ces résultats présentent une conséquence frappante : la température du fond est à peu près constante dans tous les lacs, et elle est de beaucoup inférieure à la température moyenne du lieu. De Saussure, après avoir constaté le fait, avait déclaré que les principes alors connus ne pouvaient suffire à l'expliquer. En effet, à cette époque on ne connaissait pas la propriété que possède l'eau d'avoir un maximum de densité à la température de 4° et demi, ou à peu près. C'est sur cette propriété que repose essentiellement l'équilibre de température des grandes masses fluides.

Pendant la saison chaude de l'année, deux causes concourent à élever la température des couches supérieures de l'eau des lacs : l'air, qui agit par son contact, et la chaleur solaire, qui pénètre à une profondeur plus ou moins grande. Ces couches échauffées se mêlent de mille manières par l'agitation des vagues; mais elles se mêlent sans tomber au fond, parce qu'elles sont sans cesse soutenues par leur légèreté spécifique, et parce que la plus grande agitation des vagues ne se fait jamais sentir qu'à une petite profondeur.

Ainsi, en été et jusque vers la fin de l'automne, la température doit être sans cesse décroissante avec la profondeur; c'est en effet ce que montrent les expériences de De Saussure, et ce qui a été constaté depuis par M. Labèche avec un soin particulier. (*Ann. de phys. et de chim.*, tom. XIX, pag. 77.)

Pendant la saison froide, la couche supérieure se refroidit par deux causes, par le contact de l'air froid et par le rayonnement, surtout par le rayonnement nocturne. Cette couche se contracte en se refroidissant; elle acquiert une densité plus grande, et tombe à une petite profondeur en se mêlant aux couches plus chaudes qui étaient au-dessus d'elle. Dès qu'elle tombe elle est remplacée par une autre qui se refroidit et qui tombe à son tour; une autre vient, qui éprouve les mêmes effets, et c'est par ces courans continuellement ascendans et continuellement descendans que toutes les couches supérieures se refroidissent. Mais, il ne faut pas le perdre de vue, toute la chaleur perdue vient se perdre à la surface. Si l'eau n'avait pas un maximum de densité, il est évident que pendant toute la saison du refroidissement la température serait encore décroissante avec la profondeur, car les couches les plus chaudes étant en même temps les plus légères, il faudrait, pour obéir aux lois de l'équilibre, qu'elles fussent aussi les plus élevées. Ainsi la surface ne pourrait atteindre la température zéro que quand toute la masse serait au moins à la température zéro, et par conséquent il y aurait une congélation simultanée dans toute l'épaisseur du lac, depuis la surface jusqu'à la plus grande profondeur. Mais à cause du maximum de densité, les

phénomènes se passent tout autrement. Dès que les couches de la surface sont arrivées à la température maximum, elles tombent, d'autres les remplacent qui tombent à leur tour, jusqu'à ce que toute la masse, dans toute son épaisseur, soit arrivée à cette température limite. Imaginons, pour un instant, que les froids de l'hiver se soient prolongés assez long-temps pour établir cette distribution de chaleur et de densité. Le froid continuant, et toujours par la surface, la couche supérieure ne pourra plus tomber, car elle devient plus légère en même temps qu'elle devient plus froide. L'abaissement de température pourra donc continuer pour elle et se prolonger indéfiniment, car elle restera indéfiniment plus légère. Dans une masse parfaitement calme et sans agitation, cette première couche devrait donc se congeler la première, sans que les couches inférieures participassent à l'abaissement de température, si ce n'est par la conductibilité, qui est excessivement faible dans tous les liquides, et particulièrement dans l'eau. Mais comme en réalité il se produit toujours une agitation plus ou moins violente, et par conséquent plus ou moins profonde, ce ne sera pas seulement la première couche qui se refroidira au-dessous du maximum, c'est toute l'épaisseur des couches sans cesse mêlées par l'agitation des vagues. Pendant tout ce refroidissement, les couches inférieures resteront à la température constante du maximum jusqu'aux plus grandes profondeurs. Ainsi, à cette époque, la température sera croissante avec la profondeur jusqu'à la première couche, qui est à 4° 1, et au-dessous de celle-ci la température sera constante. On ne possède pas beaucoup d'expériences faites pendant la rigueur de l'hiver; mais toutes tendent à confirmer ce résultat.

Voilà pourquoi, dans les lacs profonds, la congélation commence essentiellement par la surface, et ne pénètre jamais que très lentement à une profondeur un peu considérable.

Le même principe nous fait voir encore que, dans les eaux tranquilles et profondes, il faudra, pour déterminer la congélation, des froids très rigoureux et très long-temps prolongés. Car il faut que toutes les couches qui ont été réchauffées dans la saison chaude aient pu venir à la surface perdre la chaleur qui les maintient au-dessus de la température du maximum de densité, et si ces couches forment une épaisseur de 5 ou 600 pieds, il est évident qu'elles devront, dans les mêmes circonstances, mettre un temps bien plus long à venir tour à tour passer à la surface pour y perdre leur excès de température, que si elles formaient seulement une épaisseur de 20 ou 30 pieds. Vers les bords, sur les hancs d'une grande largeur et dans tous les lieux où il n'y a qu'une petite profondeur, on verra donc des nappes de glace se former et prendre une grande épaisseur, tandis qu'au large, où la profondeur est grande, la surface reste libre, et la température se soutient à un degré plus élevé.

Cependant il se présente ici une question à résoudre sur laquelle nous n'avons, jusqu'à présent, que des données incertaines : c'est de savoir à quelle profondeur peuvent se faire sentir les chaleurs de l'été. Si, par exemple, elles ne peuvent se faire sentir qu'à 500 pieds, un lac de 10,000 pieds de profondeur ne gèlera pas plus tard qu'un lac de 500 pieds; car, dans le premier, les couches qui sont au-dessous de 500 pieds restant à la température constante du maximum pendant toute la durée de l'année, il est évident qu'elles sont comme si elles n'existaient pas, et qu'on peut les concevoir séparées du reste de la masse sans troubler en rien les phénomènes qui se passent dans les couches supérieures.

Il serait important aussi de faire des expériences sur la température de l'eau à sa surface, au moment de la congélation; car tout semble indiquer que cette température peut s'abaisser au-dessous de zéro, sans que la congélation s'opère, soit que l'agitation continuelle des molécules s'y oppose, soit que d'autres causes encore puissent y concourir.

Si, avant la congélation, la température d'un lac a dû être un instant de 4° 1 dans toute sa profondeur, il est facile de voir qu'après le dégel, la même phénomène doit se reproduire avant que les couches superficielles puissent se réchauffer au-dessus du maximum. Ces deux états d'équilibre supposent toutefois que les causes du réchauffement et du refroidissement ne sont pas trop brusques pour que les courans ascendants et descendants puissent s'établir avec régularité.

Dans les rivières, la distribution de la chaleur s'accomplit suivant d'autres lois, à cause du mouvement de translation des molécules liquides. Il en résulte en effet un mélange continuel de couches supérieures et inférieures qui tend à établir une température uniforme dans toute la masse; cependant, comme ce mouvement est différent à la surface et au fond, au milieu du lit et vers les bords, on doit s'attendre à une suite de phénomènes accidentels déterminés par ces circonstances. Parmi ces phénomènes, ceux de la congélation sont les seuls qui aient été observés avec quelque soin. On a constaté, par des expériences décisives, que dans certains cas la congélation commence à la surface, et que dans d'autres cas, au contraire, elle commence au fond.

Quand les rivières charrient, on peut dire, en général, que tous ces glaçons, qui se heurtent et qui prennent par le choc des formes arrondies ou anguleuses, ont été primitivement formés à la surface; quelques-uns se sont détachés des bords, mais les autres n'ont été à leur origine que de petits embryons, de petites parcelles flottantes qui ont pris volume en voguant sur l'eau.

La formation des premiers n'est pas douteuse, puisqu'on voit les rivages couverts d'une lame de glace qui est sans cesse battue et sans cesse hâlée par les flots. C'est là que la congélation commence,

parce que en général l'eau y est moins profonde, et parce qu'elle est en contact avec un terrain sans cesse refroidi par l'air et par le rayonnement. La glace qui s'y attache se refroidit à son tour par cette double cause, et devient alors, comme le rivage lui-même, un corps froid capable de geler ce qui le touche. Les fragmens, volumineux ou même imperceptibles, qui sont brisés dans cette masse, deviennent flottans par leur légèreté spécifique; ils se refroidissent plus que l'eau, et les gouttes qui viennent tomber sur les bords s'y congèlent à l'instant, parce qu'elles deviennent froides et immobiles.

La formation des glaçons, à la surface même de l'eau, loin des rivages et de tous les corps solides, a été révoquée en doute par quelques physiciens; il est difficile en effet d'en donner une preuve directe, car si l'on trouve au large des fragmens de glace on même les rudimens qui les forment, on peut toujours supposer qu'ils viennent des bords et qu'ils en ont été détachés par les vagues. Mais on doit convenir cependant que la surface libre des eaux peut être indéfiniment refroidie au-dessous de zéro, et qu'ainsi elle doit enfin, malgré le mouvement, donner naissance à des aiguilles de glace qui grossissent ensuite en se refroidissant davantage par le contact de l'air et par le rayonnement.

La formation de la glace ou fond même de l'eau a été long-temps contestée; mais d'habiles observateurs on ont recueilli des preuves directes, et il s'agit maintenant d'en expliquer la cause, et non plus d'en nier la possibilité. L'eau agitée des fleuves et des rivières peut sans doute être abaissée de plusieurs degrés au-dessous de zéro sans se congeler; et là où la profondeur n'est pas très grande, toute l'épaisseur de la couche liquide peut participer à cet abaissement de température; les matières solides du fond peuvent à la fin y participer elles-mêmes par leur contact prolongé avec l'eau; mais, vers le fond, le mouvement est moins rapide qu'à la surface. Les inégalités du sol forment une multitude de petites cellules ou d'espèces d'abris où l'eau n'est que très faiblement agitée; alors on conçoit que la congélation s'y accomplisse, et même qu'elle s'y accomplisse plutôt qu'à la surface. D'autres causes peut-être peuvent encore favoriser ce phénomène; mais le rôle que jouent les surfaces solides refroidies n'est pas tel que quelques personnes le supposent, car, dans l'expérience de Fahrenheit, par laquelle on abaisse l'eau à 10 ou 12 degrés au-dessous de zéro sans qu'elle se gèle, le liquide touche les parois refroidies de la capsule qui le contient; et, dans ses points de contact, il n'éprouve pas plus de congélation que dans les points où la surface est libre.

Pour que les fleuves et les rivières puissent être congelés dans toute leur largeur, il faut un froid très vif et très soutenu; cependant ce phénomène varie avec la hauteur, la vitesse et la profondeur des eaux. Les historiens rapportent à cet égard des faits

qui ne se sont pas reproduits dans le dernier siècle, mais qui ne doivent pas pour cela être regardés comme impossibles. Ils disent, par exemple, que la mer Noire fut entièrement gelée l'an 400 et l'an 763; que le Nil fut pareillement gelé dans toute sa largeur en l'an 829. Sans remonter à des époques aussi reculées, nous citerons ici les froids les plus extraordinaires à partir du dix-septième siècle, en indiquant approximativement les températures correspondantes.

La flotte vénitienne se trouva prise par les glaces dans les loges de Venise en 1621 (-20°).

Le port de Marseille fut gelé en 1638 et en 1709 (-20°).

Charles X, roi de Suède, traversa le Petit-Belt sur la glace avec toute son armée, son artillerie, ses caissons, ses bagages, etc., en 1658.

Il paraît que, pour congeler le Rhône, il faut une température qui se soutienne quelque temps à -18° .

La Tamise fut totalement prise à Londres en 1684, en 1710 et en 1740.

La Seine gèle très souvent à Paris. Nous rapporterons quelques observations qui ont été faites sur les températures correspondantes.

Seine gelée en 1740 à -14° du therm. centig.

1742 à -10

1744 à -9

1762 à -9

1766 à -9

1767 à -10

1776 à -12

1788 à -13

Ainsi, il faut au moins une température de -9° pour déterminer la congélation de la Seine.

Lorsqu'une rivière est prise, la nappe de glace qui la couvre augmente rapidement d'épaisseur dans les premiers instans; mais ensuite le froid pénètre de plus en plus lentement, à cause de l'imparfaite conductibilité de la glace. Le rayonnement des nuits paraît avoir une grande influence sur ce phénomène; car on observe quelquefois les couches très distinctes qui se sont formées successivement au-dessous les unes des autres. Par exemple, dans l'hiver de 1821, on a compté jusqu'à vingt-neuf couches distinctes dans des glaces de 15 pouces d'épaisseur, formées sur les lacs qui environnent New-Beaven (Amérique). Vers le haut, l'épaisseur des couches variait entre 12 et 18 lignes; au bas, vers la surface de l'eau, elles étaient seulement de 3 à 6 lignes. Cependant l'on avait bien constaté que le froid avait été toujours croissant.

La glace peut, comme tous les corps, se dilater par la chaleur et se contracter par le froid. Il en résulte souvent de nombreuses fissures qui se forment avec un grand fracas; quelquefois c'est comme un feu de peloton; d'autres fois, les coups sont plus terribles que des coups de canon.

Quand les glaces n'ont pas été rompues avant la

débâcle, elles peuvent trop souvent produire d'effrayants désastres. De tous les moyens qui ont été imaginés pour prévenir ces malheurs, le plus efficace paraît être d'introduire sous la glace de distance en distance des espèces de petites bombes que l'on fait éclater ensuite. L'explosion détermine des fentes nombreuses et les fragmens qui en résultent sont assez petits pour n'être plus redoutables.

650. *De la température des mers et de la formation des glaces polaires.*

Dans ces dernières années, plusieurs habiles navigateurs ont parcouru les mers équatoriales et les mers polaires; ils ont fait partout sur les températures et sur les phénomènes qui en dépendent de nombreuses séries d'observations, qui sont infiniment précieuses pour la science; mais c'est dans leurs ouvrages qu'il en faut chercher la discussion détaillée. Nous devons nous borner ici à présenter seulement les conséquences générales auxquelles elles conduisent.

Sur la mer, à de grandes distances des côtes, la température de l'air éprouve en général dans le cours d'une journée des variations bien moindres que sur les continents.

Par exemple, sur les mers équatoriales la différence entre le maximum et le minimum du jour est tout au plus de 1 ou 2°, tandis que sur les continents elle s'élève à 5 ou 6°.

Dans les régions tempérées entre 25 et 50 degrés de latitude, la différence entre le maximum et le minimum du jour reste encore très petite, elle n'atteint rarement 2 ou 3°, tandis que sur les continents la différence est très grande; à Paris elle s'élève quelquefois à 12 ou 15°.

La température minimum est comme à terre celle du soleil levant; mais quelques observateurs pensent que le maximum se trouve près de midi au lieu d'être à deux ou trois heures.

Lorsque l'on compare la température de l'air à celle que prend la mer à sa surface on arrive aux résultats suivans :

Entre les tropiques, l'air, dans ses plus hautes températures, est, en général, un peu plus chaud que la surface de l'eau, prise aussi dans ses plus hautes températures; c'est ce que l'on peut voir dans les deux tableaux suivans, qui sont tirés d'une notice de M. Arago. (*Annuaire du bureau de longitude*, 1825).

Maxima de température de l'atmosphère, observées en plein mer, loin des continents.

	Dates.	Latitude.	Tempér.	Noms des observat.
Océan Atlantique.	1772 16 août.	14° 54' N.	+ 27° 5	Bayley.
Mer du Sud.	1773 31 août.	17° 46' S.	+ 28,9	Id.
Océan Atlantique.	1774 25 mai.	4, 5 N.	+ 28,5	Id.
Océan Atlantique.	1772 13 août.	14, 10 N.	+ 28,6	Wales.
Océan Atlantique.	1775 22 juin.	11, 12 N.	+ 29,2	Id.

Suite du tableau précédent.

Océan Atlantique.	1783 29 août.	0, 0	+ 28,6	Lammon.
Océan Atlantique.	1785 septemb.	0,58 S.	+ 27,2	Churruar.
Océan Atlantique.	1791 6 oct.	9,18 N.	+ 28,4	Doutrevent.
Mer des Moluques.	1792 27 octob.	10,41 S.	+ 20,6	Id.
Mer des Moluques.	1793 2 août.	0, 3 6.	+ 28,7	Doutrevent.
Océan Atlantique.	1800 mars.	0,33 6.	+ 27,7	Ferrius.
Mer du Sud.	1803 février.	0,11 N.	+ 25,9	Humboldt.
Océan Atlantique.	1816 18 août.	4,21 N.	+ 27,6	John Davy.
Océan Atlantique.	1816 14 mai.	4,65 N.	+ 27,5	Lamarche.
Mer de la Sonde.	1816 30 juin.	6,34 N.	+ 28,4	Basel Hall.
Mer de la Chine.	1816 3 juillet.	13,29 N.	+ 29,1	Id.
Grand-Océan.	1816 7 août.	2,10 N.	+ 28,1	John Davy.
Océan Atlantique.	1816 13 octob.	6,38 S.	+ 29,1	Lamarche.
Méditerranée.	1816 3 août.	30,12 N.	+ 28,2	Gautier.
Méditerranée.	1819 26 juin.	34,46 N.	+ 29,0	Id.
Mer Noire.	1820 23 juin.	66,42 N.	+ 29,4	Id.

Maxima de température de la mer à sa surface.

	Latitude.	Longitude de Paris.	Température.	Dates.	Noms des observat.
Océan Atlant.	7° n.	20° 3, 4 e.	+ 26,9	1772 30 août.	W. Bayley.
Mer du Sud.	17° 34' s.	208 n.	+ 28,9	1773 18 août.	Id.
Océan Atlant.	4° n.	26 e.	+ 28,3	1774 25 mai.	Id.
Océan Atlant.	6° 24' n.	22 1/2 e.	+ 28,7	1788 octob.	Churruar.
Océan Atlant.	2° n.	29 1/4 e.	+ 28,6	1803 avril.	Quarver.
Océan Atlant.	7° n.	25 1/2 e.	+ 28,8	1803 novemb.	Redman.
Océan Atlant.	02° 30' n.	22 1/2 e.	+ 28,2	1804 mars.	Ferrius.
Océan Atlant.	4° n.	21 e.	+ 28,6	1816 fév.	John Davy.
Océan Atlant.	6° n.	26 e.	+ 27,5	1816 3 août.	Lamarche.
Mer de Chine.	13 1/2° n.	110 1/2 e.	+ 29,1	1816 3 août.	Basel Hall.
Océan Atlant.	7 1/2° n.	26 1/2 e.	+ 27,3	1816 14 août.	Ch. Brudé.
Mer de Ceylan.	2 1/2° n.	75 1/2 e.	+ 28,9	1816 9 août.	John Davy.
Océan Atlant.	10° n.	20 1/2 e.	+ 29,1	1816 16 oct.	Lamarche.
Mer des Indes.	1° n.	91 e.	+ 29,6	1816 23 nov.	Ch. Brudin.
Au nord de Suva.	64 1/2° n.	58 e.	+ 28,9	1817 6 mars.	Basel Hall.

Mais lorsque l'on prend la température de l'air et de l'eau de quatre en quatre heures, comme l'a fait le capitaine Duperry, et que l'on compare ensuite toutes ces températures, telle qu'elles se sont présentées, on arrive à un résultat inverse, c'est-à-dire qu'en général l'eau est plus chaude que l'air, même entre les tropiques.

Sur 1850 observations faites par cet habile navigateur, entre 0 et 20° de latitude nord ou sud, pendant son voyage autour du monde, la mer a été

1371 fois plus chaude que l'air, et l'air seulement 478 fois plus chaud que la mer.

Dans des latitudes plus élevées, entre 25 et 50°, l'air n'est que très rarement plus chaud que la surface de l'eau; et dans les régions polaires, il est presque sans exemple que l'air se trouve aussi chaud que la mer; il est toujours plus froid, et ordinairement beaucoup plus froid.

Si nous examinons maintenant les températures absolues de la mer, à la surface et à diverses profondeurs, nous serons conduits aux conséquences suivantes :

1°. Entre les tropiques la température diminue

avec la profondeur. C'est ce que toutes les expériences confirment; nous citerons seulement les plus frappantes.

Température à la surface.	Temp. à la profondeur indiquée.	Profondeur en brasses anglaises.	Nom de l'observateur.
28,33	7,5	1000	Sabine.
30,77	8,7	100	Ross.
22,8	5,6	1000	Wauchope.

2°. Dans les mers polaires la température augmente avec la profondeur. Comme ce fait est très remarquable, nous avons cru devoir rapporter toutes les observations qui ont été faites à de très hautes latitudes.

Tableau contenant les résultats de quelques observations faites par les derniers navigateurs sur la température de l'Océan à différentes profondeurs.

POSITION.		TEMPÉRATURE			Profondeur en brasses anglaises.	NOMS des observateurs
Latitude.	Longitude.	de l'air.	de l'eau à la surface.	de l'eau à la profondeur indiquée.		
80° 0' N.	2° 39' E.	4°	— 1° 3	2° 4	100	Scoresby.
79° 4	2° 44	1,1	— 1,7	— 6,5	13	Id.
"	"	"	"	1,0	37	Id.
"	"	"	"	1,4	57	Id.
"	"	"	"	2,2	100	Id.
"	"	"	"	2,2	400	Id.
79° 4	3,18	3,3	— 1,7	2,9	730	Id.
78° 2	2,30	2,9	0,0	3,3	761	Id.
78° 0	"	4,7	"	— 0,6	118	Lord Mulgrave.
77° 4	6,10	— 1,1	— 1,7	— 1,6	50	Scoresby.
"	"	"	"	— 0,8	100	Id.
77° 15	5,50	— 8,8	— 1,6	— 1,8	30	Id.
"	"	"	"	— 1,6	40	Id.
"	"	"	"	— 1,1	80	Id.
"	"	"	"	— 1,1	100	Id.
76° 34	8,30	— 3,6	— 1,1	— 0,6	30	Id.
"	"	"	"	1,7	40	Id.
"	"	"	"	1,1	80	Id.
"	"	"	"	1,5	100	Id.
76° 18	8,30	— 8,8	— 2,0	— 1,7	30	Id.
"	"	"	"	— 2,6	50	Id.
"	"	"	"	— 1,1	123	Id.
"	8,60	— 11,1	— 1,7	— 0,1	50	Id.
"	"	"	"	1,0	123	Id.
"	"	"	"	0,7	230	Id.
75° 38	82,86 O.	"	1,1	0,6	314	Ross.
75° 2	107,34	— 0,5	— 1,1	— 0,4	94	Parry.
75° 37	79,48	"	1,4	0,6	80	Ross.
75° 35	91,21	3,8	1,1	1,1	185	Parry.
Winter.	Harbour.	— 26,8	— 2,3	— 1,1	5	Id.
72° 7	21,31 O.	5,5	1,1	— 0,6	118	Id.
70° 5	78,20	— 0,6	— 0,8	— 1,0	110	Id.
70° 0	75,20	0,5	0,0	0,1	75	Id.
71° 24	75,20	3,3	1,7	0,6	88	Id.
69° 0	"	15,3	"	0,6	673	Lord Mulgrave.
68° 25	67,20	1,1	0,00	— 0,3	35	Parry.
68° 34	65,52	— 0,5	— 0,8	— 0,8	170	Id.
"	65,28	— 1,7	— 1,1	— 1,1	318	Id.
68° 12	62,25	— 0,8	0,0	0,8	770	Id.
68° 19	62,25	1,1	0,0	1,1	148	Id.

3°. Dans les mers tempérées, comprises entre 30 et 70° de latitude, la température est d'autant moins décroissante que la latitude devient plus grande, et près du parallèle de 70° elle commence à devenir croissante.

Il existe par conséquent une zone pour laquelle la température est à peu près constante, depuis la superficie jusqu'à une profondeur très grande.

Après avoir résumé dans les propositions précédentes l'ensemble des observations qui ont été faites jusqu'à présent, il reste à chercher les causes qui peuvent maintenir cette singulière distribution de la chaleur dans la masse mobile des eaux qui remplit le vaste bassin des mers.

On conçoit d'abord pourquoi la surface des eaux ne peut pas être comparée à la surface du sol, ni pour son réchauffement pendant le jour, ni pour son refroidissement pendant la nuit; ce phénomène dépend de la mobilité du liquide, dont les molécules sont sans cesse mélangées jusqu'à une assez grande profondeur, soit par les courants qui résultent des différencés de densités, soit par l'agitation des vagues. Pendant le jour, la couche superficielle s'échauffe moins, parce qu'elle se refroidit par l'évaporation et parce qu'elle est bientôt refoulée par l'agitation; pendant la nuit elle se refroidit moins, parce qu'elle se contracte en se refroidissant, et son excès de densité la ferait bientôt retomber, si le mouvement des vagues ne venait pas à chaque instant la mélanger aux couches voisines. Ainsi le réchauffement et le refroidissement sont moins sensibles, parce qu'ils se passent l'un et l'autre dans une couche plus ou moins épaisse.

L'air participe lui-même, par son contact perpétuel, à cette uniformité de température que d'autres causes tendent à maintenir à la surface des eaux.

Mais la température des couches profondes de la mer offre de très grandes difficultés: sous l'équateur, à mille brasses de profondeur, la température est seulement de 5 ou 7°; n'est-il pas impossible que l'eau de ces couches ait pu prendre un tel refroidissement dans ces climats, puisqu'à sa surface l'eau ne tombe jamais à une température plus basse que 20 ou 25°? Vers les pôles; à 700 brasses de profondeur, la température s'élève à 2 ou 3°; n'est-il pas impossible que l'eau de ces couches ait pu prendre un tel réchauffement dans ces contrées, puisqu'à la surface, pendant la saison chaude, quand les navigateurs peuvent sillonner les mers, la température ne s'élève presque jamais au-dessus de zéro?

Ces difficultés pourraient être résolues si l'eau de mer avait, comme l'eau douce, un maximum de densité avant son point de congélation; car si ce maximum existait, et qu'il correspondît à peu près à 2° centigrades, on pourrait remarquer qu'à profondeur égale, au-dessous de la surface, l'eau des régions polaires éprouverait verticalement une

pression plus grande que l'eau des régions équatoriales, qu'elle doit par conséquent refouler celle-ci latéralement, pour prendre sa place. De là des courants *inférieurs* plus ou moins rapides apportant sous l'équateur l'eau refroidie des pôles, et comme conséquence nécessaire, des courants *supérieurs* repartant vers les pôles les eaux réchauffées de l'équateur. Mais à une certaine latitude, les eaux superficielles ayant la température maximum de 2 à 3°, au lieu de rester à la surface, s'enfonceraient de plus en plus pour gagner les pôles, et composeraient ainsi ces couches de 2 ou 3° dont l'existence a été reconnue dans les navigations circumpolaires.

Mais s'il est vrai, comme les expériences très soignées de M. Erman fils tendent à l'établir, s'il est vrai que l'eau de mer n'a pas de maximum de densité avant sa congélation, alors il devient très difficile de donner une explication satisfaisante de la température de 2 ou 3° que l'on observe à de grandes profondeurs dans les mers polaires. On éprouve le double embarras de savoir comment ces couches ont été réchauffées et comment elles se maintiennent au fond, contre les lois de la densité. On pourrait bien sans doute recourir à d'autres hypothèses: on pourrait dire que les eaux sont échauffées, parce qu'elles sont échauffées par le fond de la mer, qui conserve encore la chaleur propre, qu'il tient de sa profondeur, ou bien qu'elles sont amenées par des courants impétueux qui sont, pour le fond des mers, ce qu'est le Gulf-Stream pour leur surface. Mais au point où en est la science, les faits sont réputés inexplicables quand ils sont vaguement expliqués.

Les expériences de M. Erman fils ont donc un très haut degré d'intérêt, elles remettent en question le vaste problème de la distribution de la chaleur dans les eaux de la mer.

L'un des conséquences nécessaires de l'abaissement de température à la surface des eaux est la formation des glaces éternelles qui couvrent les régions polaires. Ce phénomène est l'un des plus grands que nous présente la nature, et nous devons essayer d'en donner une idée. Nous emprunterons particulièrement au capitaine Scoresby les détails dans lesquels nous pouvons entrer à ce sujet; son ouvrage a été en quelque sorte écrit sur les lieux; comme capitaine baléinier, il a fait douze voyages jusqu'aux plus hautes latitudes; et il est à la fois l'un des plus intrépides marins et l'un des plus habiles observateurs qui aient fréquenté ces mers périlleuses.

Les glaces que l'on rencontre sur les côtes du Spitzberg et du Groenland ont ordinairement 20 à 25 pieds d'épaisseur. Elles forment souvent des plaines immenses, dont on n'aperçoit pas les limites du haut des mâts du vaisseau; c'est ce que l'on nomme des *champs de glace*. On peut estimer leur étendue à trois ou quatre cents lieues carrées. Un champ de glace présente quelquefois une surface

parfaitement plane, sur laquelle un carrosse pourrait faire trente ou quarante lieues sans obstacle; d'autres fois il est raboteux et inégal; on voit d'espace en espace s'élever des éminences ou des colonnes de 20 ou 30 pieds de hauteur qui forment un aspect très pittoresque: tantôt elles ont la belle couleur bleue verdâtre des plus brillantes topazes, tantôt, recouvertes d'une neige épaisse, elles présentent sur leur sommet et à leur contour les accidents les plus variés.

Les ondulations de l'eau, le mouvement des vagues ou quelque autre cause puissante brisent un champ de glace en un instant, et le réduisent en fragments de 100 ou 200 mètres carrés. Ces fragments séparés se heurtent et se dispersent; mais quelquefois ils sont emportés par un courant rapide. Alors s'ils rencontrent un courant opposé entraînant les énormes débris d'un autre champ de glace, ces montagnes se choquent avec un épouvantable fracas. Un vaisseau qui se trouverait emporté dans la lutte ne pourrait pas plus résister au choc qu'une lame de verre à une balle de mousquet. On a trop d'exemples d'affreux naufrages produits par cette irrésistible puissance. C'est par les courants de cette espèce que la mer s'ouvre aux navigateurs, c'est quand ils ont balayé les glaces que l'on peut, dans certaines directions, aborder jusqu'aux parallèles de 70 à 80 degrés, où les baleines semblent de préférence fixer leur demeure.

Si quelques montagnes de glace sont brisées et comme pulvérisées dans ces terribles rencontres, il y en a d'autres au contraire qui prennent un nouvel accroissement et deviennent plus formidables. Les glaçons soulevés et balancés par les flots retombent les uns sur les autres; ils se superposent, ils se couvrent de fragments plus ou moins volumineux, et composent ainsi de véritables montagnes, accidentées de mille manières, qui s'élèvent à 20 ou 30 pieds au-dessus des eaux. L'épaisseur qui surnage est en général à la partie submergée comme 1 est à 4; ainsi la hauteur totale de ces montagnes est de 100 à 120 pieds.

Quelquefois aussi des glaçons de 30 ou 40 mètres de longueur, chargés à leurs deux extrémités, s'enfoncent tout-à-fait sous les eaux à une profondeur assez grande pour que le vaisseau passe au-dessus d'eux; mais l'équipage est alors exposé au plus affreux danger: le moindre choc, le moindre choc peut déranger l'équilibre des poids qui tiennent le glaçon submergé; alors il s'élèverait avec impétuosité et lancerait le bâtiment dans les airs, on du moins le ferait chavirer inévitablement.

Dans la baie de Baffin on trouve des montagnes de glace beaucoup plus hautes que dans les mers du Groenland: les navigateurs en ont mesuré qui s'élevaient de plus de 100 pieds au-dessus de la surface de l'eau, et qui avaient par conséquent plus de 500 pieds de hauteur totale. On suppose que ces masses effrayantes se forment sur les côtes où elles ferment les vallées qui aboutissent à la mer, et

qu'ensuite elles sont détachées soit par la pression des eaux, soit par quelque autre cause. Dans tous ces parages on voit en effet sur les côtes, des montagnes de glace taillées à pic, d'une belle couleur bleue, transparente comme l'azur du ciel, et qui s'élèvent à une hauteur prodigieuse. Dans la *saïon du soleil* les eaux coulent du haut de leur crête et forment dans la mer d'immenses cascades, qui sont quelquefois surprises par les gelées. C'est alors un majestueux spectacle, mais les navigateurs le regardent de loin: an en instant ces colonnes, ces arceaux gigantesques suspendus dans les airs se brisent avec un horrible fracas, et s'écroulent dans la mer.

La profondeur des eaux n'est pas très grande dans les parages qui avoisinent la côte occidentale du Spitzberg. Les baleines en donnant souvent la mesure d'une manière incontestable. Aussitôt qu'elles sont frappées par le harponneur, elles s'enfoncent verticalement sous les eaux avec une incroyable vitesse, emportant le harpon et la ligne; mais elles reviennent bientôt à la surface pour rendre le dernier soupir, et lorsqu'elles portent l'empreinte de la vase du fond de la mer, on peut juger que la longueur de la ligne qu'elles ont entraînée est la mesure de la profondeur. C'est environ 3 ou 4000 pieds.

Vers le milieu de l'intervalle compris entre la Spitzberg et la côte orientale du Groenland, on n'a pas trouvé de fond à 6 ou 7000 pieds.

Le capitaine Scoresby a vu fréquemment la glace se former en pleine mer à 20 lieues des côtes. Dès que les premiers embryons des cristaux deviennent perceptibles, la mer se calme comme si l'on avait répondu de l'huile à sa surface. Ces cristaux arrivent promptement à la grosseur de 3 ou 4 pouces, et c'est alors qu'ils commencent à s'agglomérer, si le froid continue, pour former des nappes de glaces plus ou moins larges, et qui ne tardent pas à avoir 1 pied d'épaisseur.

Dans ces contrées la densité de l'eau de mer est 1,026, en état de repos elle se congèle à -2° . Les eaux qui ont été concentrées par la gelée peuvent atteindre à une densité de 1,104, alors elles ne gèlent qu'à -10° , et l'on sait que l'eau saturée de sel ne peut se solidifier qu'à -20° .

Le froid des régions polaires est essentiellement lié à l'étendue et à la profondeur des eaux. Si l'on conçoit, par exemple, une mer libre et profonde, sans îles ni hauts-fonds, occupant toute la calotte des cercles polaires, et communiquant aux mers équatoriales par de larges issues, il est évident que les courants supérieurs et inférieurs tendraient à maintenir l'équilibre de température avec plus d'efficacité. Mais si au milieu de cette vaste mer on conçoit des continents ou seulement des hauts-fonds, le refroidissement qui a lieu par le rayonnement pendant la longue absence du soleil devient nécessairement très intense, puisqu'il se fait sur une surface solide qui ne se renouvelle pas, l'air

se refroidit à son tour sur ces plateaux glacés, et c'est ainsi que se produisent ces froids rigoureux qui règnent au pôle boréal.

Le voyage curieux du capitaine Weddel vers le pôle austral semble annoncer que dans ces régions la mer est beaucoup plus vaste et plus profonde que dans les régions boréales, et que même la température y est beaucoup plus douce. Dès qu'on a passé la latitude des nouvelles Orcades et des nouvelles Schetland qui forment une barrière de glace, on arrive dans une mer libre qui paraît se prolonger jusqu'au pôle. De nouveaux voyages nous fourniront bientôt de nouvelles données sur la température de ces climats, et la théorie de la distribution de la chaleur en recevra sans doute de très grands perfectionnements.

651. *De l'équilibre de température de la terre.* — Après avoir exposé les principaux résultats des expériences sur la température du globe terrestre et de l'atmosphère qui l'enveloppe, il nous reste à indiquer, autant que nous pouvons le faire dans cet ouvrage, les principales causes qui concourent à maintenir, dans toute l'étendue de la terre, la distribution de la chaleur et l'ordre des températures que l'on y observe.

Cette grande question ne peut être étudiée en détail sans le secours des mathématiques : c'est dans les mémoires et les ouvrages que M. Fourier nous a laissés qu'il en faut chercher la solution; ces travaux sont un des plus beaux monuments de notre époque. On y reconnaît partout la main d'un grand géomètre et l'esprit pénétrant d'un génie élevé. Nous en recommandons particulièrement l'étude à ceux qui s'occupent de la physique mathématique; car tout ce que nous avons à dire ici se réduit seulement à un examen général des causes qui modifient la température dans les divers climats, suivant les périodes des jours et des saisons.

En disant tout les faits connus, et en les soumettant au calcul, M. Fourier a été conduit à ces conséquences :

1° Toute la chaleur qui est au-dessous de la couche que nous avons appelée couche invariable est une chaleur primitive que le globe de la terre tient de son origine ;

2° Cette chaleur est constante et excessivement grande dans un vaste noyau central; à une certaine distance du centre elle commence à diminuer suivant des lois régulières, jusqu'à la couche de température invariable ;

3° Cet équilibre intérieur que nous observons aujourd'hui change avec le temps, et il changera sans cesse jusqu'au moment où toute la chaleur primitive sera complètement dissipée par la surface; mais ces changements s'accomplissent avec une telle lenteur qu'il faut de longues séries de siècles pour qu'ils deviennent sensibles à nos observations. Ainsi, à 200 ou 300 mètres au-dessous du thermomètre des caves de l'Observatoire de Paris, la température est aujourd'hui de 20 ou 22°; elle tombera

successivement à 19, à 18, et enfin, à 10 ou 11°; mais il faudra très long-temps pour que le commencement de cette diminution puisse être observé ;

4° Ce flux de chaleur, qui vient des couches profondes pour s'écouler par la surface, ne peut, quelque grand qu'il soit, modifier d'une quantité appréciable ni la température moyenne de la surface elle-même, ni l'ordre des températures qui s'établissent, suivant les saisons, dans toute l'écorce de la terre supérieure à la couche invariable. M. Fourier estime, par exemple, que la température superficielle ne peut pas en être affectée d'un trentième de degré centigrade ;

5° Enfin, les climats et l'ordre des saisons dépendent uniquement de la chaleur qui se distribue dans les couches supérieures à la couche invariable; cette chaleur provient uniquement de l'action du soleil; elle est accumulée pendant une partie de l'année, dissipée pendant l'autre, de manière qu'il s'établisse à la fin une exacte compensation.

Tels sont les principes généraux qu'il était nécessaire de rappeler pour comprendre la véritable influence du rayonnement que nous allons maintenant examiner.

Imaginons pour un instant que la terre, suspendue comme elle est au milieu des espaces célestes, ne soit plus chauffée ni par les rayons solaires, ni par aucun autre rayon calorifique, et suivons les phénomènes qui en résulteraient.

Toutes les molécules de l'air atmosphérique, douées du pouvoir émissif comme les autres molécules matérielles, rayonneraient leur chaleur dans tous les sens et se refroidiraient de plus en plus; car leurs pertes ne seraient point réparées. Leur densité augmentant, elles tomberaient vers la terre, tandis que d'autres molécules monteraient pour aller se refroidir à leur tour. Et, si l'on supposait que la surface de la terre ne peut pas partager avec elles la chaleur qui lui reste, il est évident qu'après un temps plus ou moins long, toutes les couches de l'atmosphère seraient arrivées à un degré de refroidissement dont nous n'avons nulle idée.

Un phénomène analogue se produirait sur la terre: les couches de la surface rayonneraient au travers de l'atmosphère; promptement refroidies par ces pertes non compensées, elles recevraient de la chaleur des couches inférieures, et cette chaleur reçue serait bientôt perdue par la même voie. Ainsi, après quelque temps, ou plutôt après quelques siècles, toute la chaleur du globe de la terre, tant la chaleur centrale et primitive que la chaleur superficielle, et maintenue par le soleil, se trouverait dissipée dans l'espace; mais cette dissipation serait plus ou moins prompte dans les divers pays, suivant que la surface du sol serait plus ou moins rayonnante, et la conductibilité des couches inférieures plus ou moins parfaite.

Ce qui arrive en supposant que l'atmosphère et la terre ne puissent pas partager leur chaleur arri-

verait de même en rétablissant cette propriété de communication que l'on ne peut supprimer que par hypothèse; car l'air pourra bien réchauffer le sol, ou le sol réchauffer l'air; mais, en définitive, la chaleur totale n'en sera pas moins perdue dans les espaces célestes.

Tout, sur la terre, parviendrait ainsi au froid absolu.

Rétablissons maintenant les choses telles qu'elles sont; supprimons encore pour un instant les rayons solaires qui arrivent à la terre, mais considérons les astres innombrables qui occupent les diverses régions du ciel. Tout nous porte à croire que ces astres si éblouissants de lumière ne sont pas dépourvus de chaleur; il y a donc probablement une certaine température dans les espaces célestes, et la terre, suspendue au milieu de ces espaces, cesserait de se refroidir lorsqu'elle en aurait pris la température, comme un corps chaud suspendu dans une enceinte quelconque cesse de se refroidir quand il a pris la température de l'enceinte.

Ainsi, abstraction faite de la chaleur solaire, le globe terrestre semblerait maintenu à un certain degré de chaleur qui a, sans nul doute, une grande influence sur la température des divers climats, et particulièrement sur la température des pôles. Plusieurs indications du calcul et de l'expérience tendent à prouver que cette température des espaces célestes est moindre que 50 ou 60° au-dessous de zéro.

Ces considérations nous permettront d'apprécier plus facilement l'action calorifique du soleil sur la terre; car cette action n'empêche pas que les phénomènes dont nous venons de parler ne se reproduisent à chaque instant; elle n'empêche pas que la terre ne se refroidisse sans cesse par son rayonnement vers les espaces célestes; mais elle produit seulement une compensation à ce refroidissement.

Examinons d'abord ce qui se passe sur la terre, dans un pays quelconque, depuis le coucher jusqu'au lever du soleil. La cause du réchauffement n'existant plus, toute la surface du sol est abandonnée au refroidissement spontané dont nous venons de parler. Si l'air est calme et parfaitement serein, la nuit sera froide, parce que l'air et la terre perdront par le rayonnement tout ce qu'ils peuvent perdre, et le perdront sans compensation. Si l'air est calme et brumeux, ou que le ciel soit couvert de nuages, le sol rayonne encore en vertu de son pouvoir émissif; mais son calorique rayonnant est absorbé par l'air: il ne peut plus traverser l'épaisseur de l'atmosphère pour aller se perdre dans les espaces célestes; il en est de même des couches humides de l'air, alors il s'établit un échange perpétuel de chaleur entre le sol et les couches inférieures de l'atmosphère, et cette chaleur ainsi conservée à la terre lui maintient une

température qui ne s'abaisse que très lentement jusqu'au soleil levant.

Comme il ne faut qu'un brouillard très léger pour arrêter la lumière, il ne faut non plus qu'une vapeur vésiculaire à peine perceptible à l'œil pour arrêter la chaleur rayonnante qui traverse toujours les corps bien plus difficilement que la lumière.

Nous avons supposé l'air parfaitement calme, parce qu'il est évident que le vent modifie les phénomènes: il a lui-même une température propre, et par son contact avec les corps il la leur communique d'une manière plus ou moins complète, suivant qu'il souffle avec plus ou moins d'impétuosité.

Ces principes sur le rayonnement nocturne conduisent aux deux conséquences suivantes:

1° Sous des circonstances favorables (c'est-à-dire, par un temps calme et un ciel serein), la température, à la surface du sol, peut dans les lieux découverts s'abaisser de plusieurs degrés au-dessous de la température des couches inférieures de l'air;

2° Le degré d'abaissement de température des corps à leur surface sera d'autant plus grand qu'ils auront un pouvoir émissif plus grand et une conductibilité moins parfaite.

Ces deux conséquences ont eu effet été vérifiées par le docteur Wells, ou plutôt elles ont été découvertes par lui, à une époque où les principes du rayonnement nocturne n'étaient pas encore bien connus. Le docteur Wells a constaté par l'expérience que les corps très rayonnants peuvent quelquefois s'abaisser de 8 ou 10° au-dessous de la température de l'air, depuis le soir jusqu'au matin. Ces observations l'ont conduit à l'explication de la gelée et de la rosée, et de plusieurs autres phénomènes météorologiques, comme nous le verrons dans l'un des chapitres suivants.

Pendant le jour, le rayonnement se continuera comme pendant la nuit, mais ses effets seront alors modifiés par une cause puissante. Considérons, par exemple, les phénomènes à partir du mois de janvier, qui est à Paris le mois le plus froid de l'année; depuis le lever du soleil, si le ciel est serein, l'air et tous les corps commenceront à recevoir une compensation à leur perte; cette compensation est croissante pendant tout le temps que le soleil s'élève sur l'horizon: elle atteint son maximum un peu après midi, puis elle devient décroissante jusqu'au soir, où elle est nulle. Pour l'époque que nous avons choisie, la quantité de chaleur reçue par la présence du soleil sera un peu plus grande que la quantité de chaleur perdue pendant la double durée de sa présence et de son absence. Cet excédant de chaleur acquies pendant le jour sur la chaleur perdue pendant le jour et pendant la nuit va en augmentant jusqu'au mois d'août, qui est également pour Paris le mois du maximum de chaleur; passé ce terme, le soleil reste encore plus efficace

qu'au mois de février eude mars. Mais comme la surface de la terre est à une température plus haute, elle perd beaucoup plus par le rayonnement; et quoiqu'elle reçoive du soleil une quantité absolue de chaleur plus grande, elle va en se refroidissant; et ce qu'elle perd l'emporte ainsi sur ce qu'elle reçoit jusqu'au mois de janvier suivant.

Dans cet aperçu général de la cause primitive qui détermine la marche des saisons, nous ne tenons aucun compte des causes accidentelles qui peuvent d'un jour à l'autre en modifier les résultats. Le vent, les brouillards, les nuages, la pluie et une foule d'autres circonstances peuvent augmenter ou diminuer les pertes de chaleur qui se versent faites dans un lieu donné, si l'air est calme, et le ciel sans nuages. C'est le concours de ces causes accidentelles qui détermine souvent des changements brusques de température dans la durée d'un jour, et qui donne des jours chauds dans l'hiver et des jours froids dans l'été. Mais les irrégularités que l'on observe ainsi dans les divers climats ne sont elles-mêmes qu'une sorte de compensation; par exemple, si le vent réchauffe un lieu, il en refroidit un autre : c'est la même quantité de chaleur autrement répartie. L'équilibre de température est maintenant établi : la terre perd exactement chaque année toute la quantité de chaleur qu'elle reçoit du soleil; car si elle en perdait moins, tous les climats deviendraient chaque année plus chauds, et si elle en perdait plus, ils deviendraient chaque année plus froids, ce qui est tout à fait contraire à l'expérience des siècles.

Ici se présente un problème d'un très grand intérêt pour la science : c'est de déterminer avec précision quelle est cette quantité constante de chaleur, qui est versée par le soleil sur le globe de la terre dans le cours d'une année, qui est accumulée en chaque lieu pendant certaines saisons, puis distribuée entre les divers climats, puis enfin perdue par le rayonnement, avec une si admirable régularité qu'il n'en reste pas de trace au commencement de l'année suivante. Ce problème a été résolu par ces expériences directes qui semblaient d'abord très difficiles, et qui sont énoncées d'une grande simplicité. Je puis donner ici une idée des principes sur lesquels elles reposent, et des conséquences auxquelles elles conduisent.

L'appareil dont je me suis servi pour ces recherches est représenté dans la figure 777; c'est un cylindre à double enveloppe d'environ deux pieds de long sur quatre peues de diamètre. Tout l'espace est compris entre les deux enveloppes est rempli de glace pilée. L'extrémité *s*, qui doit être tournée vers le soleil, porte une espèce de tuyau fermé à un bout avec un verre parallèle *v*, et portant à l'autre bout un petit diaphragme *n*, percé d'une ouverture déterminée. L'autre extrémité *r* porte un thermomètre à boule noire. Si l'on cou-

voit un cône qui ait pour sommet le centre de la boule du thermomètre, et pour base l'ouverture du diaphragme *n*, ce cône prolongé doit précisément envelopper le disque du soleil, c'est-à-dire, que son angle au centre est d'environ 32'. On fait le vide dans l'espace intérieur au moyen du robinet *a*.

L'appareil est disposé sur le pied d'un télescope, et au moyen d'un petit trou percé dans une plaque additionnelle *x*, et d'un repère tracé en *i* sur une plaque d'ivoire, on peut avec exactitude diriger les mouvements pour que l'axe *aa'* soit dirigé vers le centre du soleil.

Ces conditions étant remplies, on observe le thermomètre, et l'on soutient l'expérience jusqu'au moment où il atteint son maximum. Comme sa température est séro, lorsqu'il ne reçoit pas le faisceau de lumière solaire, il est évident que l'effet de la chaleur solaire est mesuré par l'élévation du thermomètre au-dessus de 0. Cette élévation est dépendante de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon. En tenant compte de toutes les corrections qu'il faut faire pour la portion de chaleur qui est absorbée par le verre *v*, et qui est déterminée par des expériences préalables, on peut évaluer facilement l'effet des rayons solaires sur le thermomètre aux différentes heures de la journée. C'est ce que j'ai fait par de nombreuses séries d'expériences, depuis le lever jusqu'au coucher du soleil pendant un grand nombre de jours, à diverses époques de l'année.

Le maximum d'élévation du thermomètre a toujours lieu à midi; il est au solstice d'été de 7°,6.

C'est de cette donnée fondamentale et des constantes qui caractérisent le thermomètre que l'on peut déduire par le calcul la quantité totale de chaleur que la soleil verse, par exemple, en 1" de temps, sur un espace de 1 centimètre carré, ou sur une autre surface quelconque, et par conséquent, la quantité totale de chaleur qu'il verse dans le cours d'une année sur tout le globe de la terre.

Il résulte de ces expériences et de ces calculs que cette quantité de chaleur est égale à celle qui serait nécessaire pour fondre une couche de glace qui couvrirait toute la surface de la terre, et qui aurait 14 mètres d'épaisseur.

Telle est donc, en dernier résultat, la quantité totale de chaleur que notre planète reçoit du soleil dans le cours de l'année. Une portion est immédiatement perdue tout autour de la terre par le rayonnement du jour et de la nuit, et c'est la portion restante qui est absorbée pendant les mois de température croissante qui pénètre dans le sol, à une certaine profondeur, jusqu'à la couche invariable, et qui remonte peu à peu pendant les mois de température décroissante, pour venir réchauffer la surface et se perdre à son tour dans les espaces célestes. Nous ne parlons ici que du mouvement

descendant et ascendant de la chaleur, afin de présenter le phénomène dans toute sa simplicité ; mais l'on conçoit que, dans toute l'épaisseur de l'écorce terrestre comprise entre la surface du sol et la couche invariable, il existe un mouvement latéral par lequel une partie de la chaleur absorbée sous la zone torride et sous les zones voisines, se transmet progressivement dans les deux hémisphères, pour aller se dissiper à la surface des régions

polaires. Ce mouvement latéral concourt puissamment avec les courants de la mer et de l'atmosphère pour tempérer tous les climats à la surface de la terre ; sans l'influence combinée de ces diverses causes, les belles contrées de l'équateur seraient sans doute inaccessibles à l'homme par leur excessive chaleur, et les hautes latitudes ne seraient pas moins inaccessibles par le froid prodigieux auquel elles seraient exposées.

CHAPITRE II.

DE L'AIR ET DES VENTS.

Des observations barométriques.

652. Les observations barométriques peuvent conduire à la solution de plusieurs problèmes qui ont un très haut degré d'intérêt ; mais il serait facile de s'égarer dans ces recherches, il serait facile de faire une foule d'observations parfaitement exactes et cependant inutiles. Nous devons donc nous attacher ici à indiquer les principales questions que les observateurs se proposent, et à faire connaître les méthodes qu'ils emploient et les résultats auxquels ils sont déjà parvenus. Pour atteindre ce but nous ne pouvons mieux faire que de prendre pour guide un excellent mémoire, dans lequel M. Bouvard a discuté avec un soin scrupuleux toutes les observations barométriques de l'Observatoire royal de Paris.

Dans nos climats on observe le baromètre quatre fois par jour :

- à neuf heures du matin,
- à midi,
- à trois heures après-midi,
- à neuf heures du soir.

L'observation de midi donne la hauteur moyenne du jour, et par suite la hauteur moyenne du mois et de l'année. Les trois autres observations servent à déterminer les *variations horaires*, ou ce que l'on appelle quelquefois la *période barométrique*.

La hauteur moyenne du baromètre dans un lieu ne peut être déterminée que par les moyennes d'un grand nombre d'années.

Nous avons vu (82) que la moyenne de dix années, depuis 1816 à 1825, est pour Paris 755,966. Or les moyennes des années suivantes sont :

Pour 1826	. . . 757,27
1827	. . . 756,01
1828	. . . 756,06
1829	. . . 755,13.

Il est facile d'en déduire que la hauteur moyenne

déterminée par ces quatorze années est exactement 756 millimètres. Et, comme les moyennes extrêmes sont, la plus haute 757,879 (elle appartient à 1825), et la plus basse 754,16 (elle appartient à 1816), dont la différence est 3,52, on en peut conclure que la hauteur moyenne du baromètre à Paris est jusqu'à présent déterminée avec une approximation probable de $\frac{3,52}{14}$, ou environ 2 centièmes et demi de millimètre.

La direction des vents a une grande influence sur la hauteur moyenne du baromètre ; car en prenant, depuis 1815 jusqu'à 1826 inclusivement, c'est-à-dire pendant cent quarante-quatre mois, les moyennes hauteurs de midi, correspondantes aux différents vents, on arrive aux résultats contenus dans le tableau suivant :

Vents.	Nombre des observations.	Hauteurs à midi.
Sud.	682	752,98
Sud-ouest. . . .	727	752,38
Ouest.	853	756,08
Nord-ouest. . . .	335	758,67
Nord.	483	759,78
Nord-est.	378	759,89
Est.	324	757,04
Sud-est.	231	754,60
Moyenne.		756,42

La plus petite hauteur correspond aux vents du sud, sud-ouest, et la plus grande aux vents nord, nord-est ; la différence s'élève à plus de 7 millimètres. On peut même voir qu'en prenant la moyenne de deux vents opposés on trouve une valeur très rapprochée de la moyenne réelle. Ce résultat de la discussion des observations barométriques qui embrassent douze années, est extrêmement remarquable. Il soulève une question importante, et dans chaque localité, les mé-

téorologistes ne peuvent apporter trop de soins à rassembler tous les éléments qui doivent servir à la résoudre. Comme la direction des vents est difficile à apprécier, il conviendrait sans doute de noter particulièrement les vents bien prononcés, afin de ne pas faire entrer, dans la discussion, des éléments incertains.

Lorsque après avoir recueilli des matériaux plus complets, on se proposera de rechercher si la hauteur moyenne du baromètre est la même au niveau de toutes les mers, on voit que la considération des vents régnans ne pourra être négligée. Dans certains lieux le vent du sud donnera la hauteur minimum, comme à Paris; dans d'autres sans doute il donnera la hauteur maximum, et il sera curieux de rapprocher ces effets contraires des autres propriétés de température ou d'humidité que les différens vents possèdent dans les différentes contrées.

Les variations diurnes du baromètre exigent des soins assidus et des instrumens très parfaits; elles se déduisent, comme nous l'avons dit des trois observations de neuf heures du matin, de trois heures et de neuf heures du soir. Les résultats obtenus par M. Bouvard sont contenus dans le tableau suivant :

Hauteurs moyennes annuelles du baromètre pour les différentes heures du jour, et variations diurnes moyennes qui s'en déduisent.

ANNÉES.	à 9 heures du matin.	à 3 heures du soir.	à 9 heures du soir.	variation du matin au soir.	variation du soir au matin.
1816	754,359	753,683	754,051	0,676	0,375
1817	756,676	755,914	756,510	0,762	0,567
1818	756,882	755,473	755,961	0,909	0,488
1819	755,343	754,561	754,993	0,762	0,412
1820	756,325	755,611	755,973	0,714	0,362
1821	756,276	755,568	756,068	0,678	0,470
1822	757,726	757,011	757,310	0,717	0,362
1823	755,197	754,463	754,773	0,704	0,280
1824	755,964	755,366	755,569	0,715	0,300
1825	757,966	757,122	757,324	0,844	0,102
1826	757,584	756,756	757,087	0,828	0,331
Moyennes.	756,347	755,591	755,956	0,756	0,373

On voit que la plus petite valeur de la période de neuf heures du matin à trois heures du soir est plus grande que la plus grande valeur de la période de trois heures du soir à neuf heures du soir; et que dans chaque période les différences sont assez petites en passant d'une année à l'autre. La dernière ligne fait voir le résultat définitif, ou les valeurs moyennes conclues de ces onze années; ainsi, la période de neuf heures du matin à trois heures du soir est un peu plus grande que trois quarts de millimètre, et la période de trois heures du soir à

neuf heures du soir un plus grande que un tiers de millimètre.

Il était curieux de rechercher l'influence des saisons sur ces résultats: et pour y parvenir il suffisait de chercher les valeurs moyennes des périodes pour chacun des mois, pendant les onze années d'observations; ces moyennes sont contenues dans le tableau suivant.

Hauteurs moyennes du baromètre réunies par mois de même dénomination.

De 1816 à 1827.	à 9 heures du matin.	à 3 heures du soir.	à 9 heures du soir.	variation du matin au soir.	variation du soir au matin.
Janvier.	756,106	757,429	757,690	0,677	0,261
Février.	758,165	757,236	757,357	0,999	0,321
Mars.	756,303	755,406	755,823	0,797	0,500
Avril.	755,253	754,243	754,780	1,010	0,537
Mai.	755,253	754,440	754,786	0,823	0,346
Juin.	757,307	756,600	756,875	0,707	0,275
Juillet.	756,554	755,817	756,140	0,737	0,323
Août.	756,807	755,953	756,271	0,854	0,318
Septembre.	756,773	755,979	756,432	0,801	0,460
Octobre.	754,778	754,021	754,528	0,751	0,501
Novembre.	755,822	755,277	755,660	0,545	0,363
Décembre.	755,152	754,705	754,950	0,449	0,247
Moyennes.	756,347	755,591	755,956	0,756	0,373

Les conséquences que présente ce tableau sont :
1^o Que la période de trois heures du soir à neuf heures du soir n'éprouve que des variations petites et irrégulières dans les différens mois ;

2^o Que la période de neuf heures du matin à trois heures du soir éprouve au contraire des variations considérables et dans lesquelles se laisse apercevoir une sorte de régularité; car la valeur de cette période se maintient constamment moindre pendant les trois mois de novembre, décembre et janvier, constamment plus grande pendant les trois mois de février, mars et avril, et conserve une valeur intermédiaire et variable pendant les six autres mois de l'année.

Il importe de chercher des résultats analogues dans les différens climats.

Enfin la période barométrique est soumise aussi à l'influence du vent; elle est presque nulle par les vents du sud, et atteint son maximum par les vents du nord.

Outre les deux périodes du matin et du soir dont nous venons de parler, il y a aussi deux périodes de nuit : le baromètre descend depuis neuf heures du soir à quatre heures du matin environ, et remonte depuis quatre heures du matin à neuf heures du matin, où il atteint son maximum. Ces périodes ont été constatées et mesurées par M. de Humboldt, dans toute l'Amérique équatoriale. Mais le baromètre n'étant pas régulièrement observé à Paris pen-

dant la nuit, on ne sait pas si ses oscillations sont régulières, et si elles reproduisent dans une certaine proportion les périodes équatoriales.

Tout ce qu'il est donc possible de faire à présent est de comparer les périodes du matin et du soir dans les différents climats, et même, comme la période du matin a une valeur plus grande, c'est à celle-là que l'on peut s'arrêter pour cette comparaison. Voici les résultats qui ont été publiés sur ce sujet par M. de Humboldt.

Tableau des variations diurnes du baromètre, suivant les latitudes.

OBSERVATEUR.	LIEN.	HAUTEUR.
Humboldt et Bonpland . . .	Amérique équatoriale, lat. 2° nord à 12° sud, entre 0' à 1500' d'élévation. . .	2,55
La Condamine . .	À Quito, au Pérou, à 0° de lat. et à 1492' au-dessus de la mer.	2,82
Duperrey . . .	À Payta, côtes du Pérou, lat. 5° au niveau de la mer.	3,40
Bussongault et Rivero . . .	Santa-Fé de Bogotá, à 4° 35' nord, à 1366' d'élévation.	2,39
Dorta, Freyrie et Kuchwege . .	La Guaira, lat. 10° 36' nord, au bord de la mer. . .	2,44
	Brésil, Rio-Janeiro, lat. 22° 54' sud, et aux Missions des Iedians . . .	2,34
Léopold de Buch . .	Las-Palmas, Canaries, lat. 28° 8' nord. . .	2,10
Contelle . . .	Ào Caire, Égypte, lat. 30° 3' nord. . .	1,75
Marqué-Victor . .	Toulouse, lat. 43° 34' nord.	1,20
Gambart . . .	Marseille, lat. 43° 18' nord.	0,72
Billet . . .	Chambéry, lat. 45° 34' nord, 1371' d'élévation. . .	1,00
Ramond . . .	Clermont-Ferrand, lat. 45° 46' nord, 210'. . .	0,94
Herrenschneider . .	Straßbourg, lat. 48° 34' nord.	0,80
Boissardot . . .	Paris, Observatoire, lat. 48° 50' nord. . .	0,76
Nell de Bréauté . .	La Chapelle, près Dieppe, lat. 49° 55' nord. . .	0,36
Basse et Sommer . .	Königsberg, lat. 54° 42' nord.	0,20
Ferry . . .	lat. 74° nord. . .	0,00

Ainsi la période du matin, à peu près constante sous l'équateur dans toute la zone des tropiques et jusqu'à la hauteur de 3000 mètres, diminue ensuite rapidement à mesure que la latitude augmente. C'est sans doute dans cette loi de diminution progressive que l'on doit chercher les causes du phénomène lui-même; tout semble indiquer qu'il tient à la température plus encore qu'à la position du soleil.

Dans toutes les observations barométriques, il y a en général deux corrections essentielles à faire, l'une pour la capillarité et l'autre pour la température. Dans les baromètres de M. Gay-Lussac la capillarité est corrigée par l'instrument lui-même, et

c'est toujours un avantage; car, malgré tous les calculs, il peut rester de l'incertitude sur la vraie valeur de la dépression capillaire.

Cependant plusieurs météorologues n'ayant à leur disposition que des baromètres à cuvette et à syphon, nous rapporterons ici pour leur usage une table de la grandeur des corrections qu'il y a à faire suivant le diamètre du tube dans la lieue qui est occupé par le sommet de la colonne.

Dépressions du mercure dans le baromètre, dues à sa capillarité.

Diamètre Int. du tube.	Dépression.	Différence.	Diamètre Int. du tube.	Dépression.	Différence.
mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
21,00	0,028	0,004	11,50	0,293	0,037
20,50	0,032	0,004	11,00	0,330	0,042
20,00	0,036	0,005	10,50	0,372	0,047
19,50	0,041	0,006	10,00	0,419	0,054
19,00	0,047	0,006	9,50	0,473	0,061
18,50	0,053	0,007	9,00	0,534	0,070
18,00	0,060	0,008	8,50	0,604	0,080
17,50	0,068	0,009	8,00	0,684	0,091
17,00	0,077	0,010	7,50	0,775	0,102
16,50	0,087	0,012	7,00	0,877	0,114
16,00	0,099	0,013	6,50	0,995	0,141
15,50	0,112	0,015	6,00	1,136	0,170
15,00	0,127	0,016	5,50	1,306	0,201
14,50	0,143	0,018	5,00	1,507	0,245
14,00	0,161	0,020	4,50	1,752	0,301
13,50	0,181	0,023	4,00	2,053	0,362
13,00	0,204	0,026	3,50	2,415	0,427
12,50	0,230	0,030	3,00	2,802	0,492
12,00	0,260	0,035	2,50	3,254	0,565
11,50	0,295		2,00	4,778	

La correction de température dépend à la fois du coefficient de dilatation du mercure et du coefficient de dilatation linéaire de l'échelle sur laquelle sont marquées les divisions; car il est évident que si l'échelle se dilatait précisément autant que le mercure, il n'y aurait pas lieu à correction.

Les échelles sont ordinairement en verre, comme dans le baromètre de M. Gay-Lussac, ou en cuivre, comme dans le baromètre de Fortin.

En adoptant :

0,000182 pour la dilatation du mercure,
0,0000086 de verre,
0,0000172 du cuivre.

Il est facile de voir que la correction correspondante à chaque degré du thermomètre centigrade sera :

0,000172 pour le baromètre de M. Gay-Lussac,
0,000103 pour les baromètres de M. Fortin.

Par conséquent si l'on représente

par u une hauteur observée,
par t la température correspondante,

la hauteur observée devra être diminuée ou augmentée

de 77, 0,000172 dans les barom. de M. Gay-Lussac, et de 77, 0,000163 dans les barom. de M. Fortin, suivant que la température T sera plus grande ou plus petite que zéro.

Dans les observations sédentaires, il suffit de faire les corrections de température sur la moyenne hauteur barométrique du mois, en adoptant pour T la température moyenne de ce même mois.

Des vents.

653. On a beaucoup écrit sur les vents; on a même fait beaucoup d'observations sur leur direction, sur leurs changemens périodiques ou irréguliers; et cependant nous n'aurons ici que très peu de chose à en dire. C'est un sujet si vaste et si compliqué qu'il a été impossible jusqu'à présent de déduire quelque loi générale de l'ensemble des observations connues. Il faudrait compiler tous les registres météorologiques, examiner pour un même instant l'état des vents sur tous les points du globe et discuter les changemens simultanés qui surviennent dans les instans successifs; cette tâche immense sort des bornes d'un ouvrage élémentaire; si elle avait été remplie nous en pourrions profiter pour résumer en peu de paroles les faits généraux auxquels elle doit nécessairement conduire.

On a cru remarquer que dans certains lieux les vents se succèdent dans un ordre déterminé; mais ces observations, beaucoup plus simples en elles-mêmes puisqu'elles sont plus restreintes, présentent encore trop d'incertitudes pour qu'il nous soit permis de les discuter ici.

Nous nous bornerons à quelques remarques sur la direction des vents et sur les causes générales que l'on peut leur assigner.

Les vents peuvent se propager par *impulsion* et par *aspiration*. Nous désignerons ainsi deux modes opposés qui doivent être soigneusement distingués. Le vent se propage par *impulsion* quand le soufflet a lieu dans un sens et la marche progressive dans le même sens; c'est ce qui arrive au vent qui sort d'un soufflet dans lequel l'air est comprimé; le vent se propage par *aspiration* quand le soufflet a lieu dans un sens et la marche progressive en sens contraire; c'est ce qui arrive au vent qui entre dans un soufflet où l'air est raréfié; le soufflet a lieu vers la huse et la marche progressive du courant a lieu en sens contraire; car les points les plus éloignés sont ceux qui reçoivent les derniers l'impulsion.

Ce dernier mode n'est pas aussi rare qu'on le pense; nous en verrons la preuve dans l'article suivant en parlant des ouragans; et Wargentin l'avait aussi remarqué sur les vents, dans le nord de l'Europe: quand le vent passe à l'ouest, dit-il, il se fait sentir à Moscou plutôt qu'à Abo, quoique cette dernière ville soit de près de quatre cents lieues

plus occidentale que Moscou; et il ne parvient en Suède qu'après avoir préalablement soufflé en Finlande.

Entre toutes les causes que l'on assigne aux vents, l'une des plus puissantes est sous aucun doute la prompte condensation des vapeurs dans le sein de l'atmosphère. On voit quelquefois tomber un ponce d'eau en une heure sur une grande étendue de pays, particulièrement dans les régions équatoriales. Or supposons seulement que cette étendue soit de dix lieues de côté ou de cent lieues carrées; si la vapeur, qui est nécessaire pour produire un ponce sur cent lieues carrées, était dans l'air à l'état élastique et seulement à 10° de température, elle occuperait un espace cent mille fois plus grand qu'à l'état liquide, c'est-à-dire qu'elle occuperait un espace de cent lieues carrées sur 100000 ponce ou presque 10000 pieds de hauteur. Telles seraient donc les dimensions du vide qui résulterait de cette condensation. A la vérité la vapeur n'est pas à l'état élastique: elle est à l'état vésiculaire; mais par cela seul qu'elle resto suspendue dans l'atmosphère elle a probablement une densité moindre qu'à l'état liquide, et sa condensation en gouttes de pluie produit encore un vide immense qui ne peut se remplir sans exciter une grande secousse atmosphérique.

DES OUBAGANS.

De quelques effets produits par les ouragans.

654. Dans la zone torride et dans tous les climats à hautes températures, les ouragans sont fréquens et se déploient avec une violence prodigieuse; dans nos climats tempérés ils sont à la fois plus rares et moins violens; et, dans les régions polaires, les grandes secousses atmosphériques, qui sont du reste assez habituelles, se réduisent, à ce qu'il paraît, à des vents de tempête ou seulement à des vents très forts. Les ouragans occupent en général une grande étendue en largeur et une étendue encore plus grande en longueur: on en pourrait citer qui ont parcouru quatre ou cinq cents lieues avec une intensité presque égale; ils se propagent comme le vent par un mouvement de translation dans une direction à peu près constante; ce qui les caractérise, c'est leur vitesse qui est excessive; elle est quelquefois de plus de vingt lieues à l'heure. Il n'y a point d'agent caché qui soit en jeu dans les ouragans, point de fluide impondérable analogue à l'électricité qui exerce une action directe; ce n'est, en dernier résultat, que de l'air en mouvement qui agit par sa puissance mécanique: et l'air est si léger, que toute sa puissance semble devoir être extrêmement bornée; mais la force que les molécules d'air n'ont pas par leur masse, elles la prennent par leur vitesse, et elles deviennent ainsi capables de produire des effets qui paraissent d'abord incroyables, et qui sont cependant conformes aux lois de la mécanique.

Pour donner une juste idée de ces effets nous rapporterons ici quelques-uns des trop fameux désastres causés par l'ouragan qui a dévasté la Guadeloupe le 25 juillet 1826.

Des maisons solidement bâties ont été renversées; un édifice neuf, élevé aux frais de l'état avec la plus grande solidité, a eu une aile entière complètement rasée.

Le vent avait imprimé aux tuiles une telle vitesse, que plusieurs pénétrèrent dans des magasins à travers des portes épaisses.

Une planche de sapin d'un mètre de long, de deux décimètres et demi de large et de vingt-trois millimètres d'épaisseur, se mouvait dans l'air avec une si grande rapidité, qu'elle traversa d'outre en outre une tige de palmier de quarante-cinq centimètres de diamètre.

Une pièce de bois de vingt centimètres d'équarrissage et de quatre à cinq mètres de long, projetée par le vent sur un chemin ferré, battu et fréquenté, entra dans le sol de près d'un mètre.

Une belle grille en fer, établie devant le palais du gouverneur, fut entièrement rompue.

Trois canons de 24 se déplacèrent jusqu'à la rencontre de l'épaulement de la batterie qui les renfermait.

Nous avons choisi de préférence cet exemple parce qu'il est récent et authentique. Un de nos officiers supérieurs les plus distingués, le général du génie Baudrand, aide-de-camp du prince royal, duc d'Orléans, a eu l'occasion de constater sur les lieux l'exactitude de ces faits.

Pour expliquer ces phénomènes, il n'y a qu'une seule difficulté, celle de savoir comment l'air a pu recevoir dans l'atmosphère une si prodigieuse vitesse; car cette vitesse étant donnée, les actions mécaniques les plus étonnantes en deviennent des conséquences nécessaires. C'est du gaz en mouvement qui pousse le boulet hors du canon, et c'est aussi du gaz en mouvement qui lance dans les airs des quartiers de rocher lorsqu'une mine fait son explosion.

De la direction des ouragans. Les ouragans peuvent, comme le vent, se propager par *impulsion* ou par *aspiration*. Ce second mode mérite toute l'attention des météorologistes, parce qu'il fournit une donnée importante sur la cause du mouvement. Nous rapporterons ici divers exemples dans lesquels il a été constaté d'une manière précise. C'est Franklin qui paraît en avoir le premier fait l'observation. Il rapporte quelque part dans ses lettres (*Letters and Papers on philosophical subjects*... 36^e lettre), qu'ayant voulu observer une éclipse de lune à Philadelphie, il en fut empêché par un ouragan du nord-est, qui se manifesta sur les sept heures du soir, et amena, comme d'ordinaire, des nuages épais qui couvrirent tout le ciel. Il fut surpris quelques jours après d'apprendre qu'à Boston, situé environ à quatre cents milles au nord-est de Philadelphie, la tempête n'avait commencé qu'à

onze heures du soir, long-temps après l'observation des premières phases de l'éclipse; et comparant ensemble les rapports recueillis dans diverses colonies, Franklin observa constamment que cette tempête du nord-est avait eu lieu d'autant plus tard que la station était plus septentrionale, et qu'ainsi le vent soufflait dans un sens et avançait progressivement en sens contraire.

M. Mitchell a observé deux phénomènes analogues, l'un en février 1802 et l'autre en décembre 1811.

L'ouragan du 21 février 1802 se fit sentir

Latitude nord.

A Charlestown. . .	34° 45',	le 21 février, à deux heures après midi,
A Washington. . .	38° 55',	à cinq heures du soir,
A New-York. . . .	40° 40',	à dix heures du soir,
A Albany.	44° 00',	le 22 février, au point du jour.

Ainsi il avançait du sud au nord, et cependant partout le vent soufflait du nord-est.

L'ouragan du 23 décembre 1811 se fit sentir

Latitude nord.

Au nord du cap Batteras	35° 15',	le 23 décembre, à huit heures du soir,
A Washington.	38° 55',	à 10 heures.
A New-York.	40° 40',	à minuit;
A Lyme.		le 24 décembre, à deux heures du matin.
A Boston.	42° 22',	à quatre heures du matin.

Ainsi il avançait du sud au nord, et cependant partout la tempête se faisait sentir par d'épouvantables bouffées de vent du nord. A Norfolk le thermomètre descendit de près de 17° centigrades, dans la seule nuit du 23 au 24 décembre. Des troupeaux et plusieurs individus, surpris en rase campagne, dans le voisinage de Boston, par ce froid intense et subit, périrent gelés. Jamais peut-être on ne compta autant de naufrages sur la côte des États-Unis, et en particulier sur celle de Long-Island, en face de New-York. (*Ann. de phys. et de chim.* tom. IX, pag. 66.)

Ces phénomènes semblent indiquer, comme Franklin le supposait, qu'il se fait de temps à autre, au-dessus du golfe du Mexique, une grande raréfaction dans l'atmosphère; soit que cette raréfaction provienne d'une subite précipitation de vapeurs, soit qu'elle ait quelque autre cause inconnue. Dans tous les cas, il est plus facile de concevoir une si grande vitesse produite dans l'air par aspiration que par impulsion; car on ne con-

nait aucune cause qui puisse directement repousser l'air avec tant d'impétuosité.

Des trombes.

655. Le phénomène des trombes est en même temps le plus extraordinaire des phénomènes météorologiques, dans les effets qu'il produit, et le plus incompréhensible dans ses causes. Pour en donner une juste idée, nous rapporterons textuellement la description de deux trombes qui ont été observées dans ces derniers temps, l'une entre Boulogne et Saint-Omer, en 1822, l'autre dans les environs de Trèves, en 1829.

Extrait d'un rapport, rédigé par M. Desmarquoy, sur une trombe qui a dévasté plusieurs communes du Pas-de-Calais, le 6 juillet 1822.

« Le 6 juillet 1822, à une heure trente-cinq minutes de l'après-midi, dans la plaine d'Onsonval, village situé à six lieues ouest-sud-ouest de Saint-Omer et à six lieues sud-est de Boulogne, des laboureurs durent quitter leur charrue à cause de l'obscurité et par la crainte d'un orage dont ils étaient menacés. Des nuages, venant de différents points, se rassemblaient rapidement au-dessus de la plaine. Bientôt ils s'en formèrent qu'un, qui, seul, couvrait entièrement l'horizon. Un instant après, on vit descendre de ce nuage une vapeur épaisse, ayant la couleur bleuitre du soufre en combustion : elle formait un cône renversé dont la base s'appuyait sur la nue. La partie inférieure du cône, qui descendait sur la terre, forma bientôt en tournoyant avec une vitesse considérable, une masse oblongue, de 30 pieds environ, détachée du nuage. Elle s'éleva en faisant le bruit d'une bombe de gros calibre qui éclate, laissant sur la terre un enfoncement, en forme de bassin circulaire de 20 à 25 pieds de circonférence, et de 3 à 4 pieds de profondeur à son milieu. À peine éloignée de cent pas du point de départ, et dirigeant sa route de l'ouest à l'est, la trombe franchit la haie d'un masoir, y abat un grange, et donne à la maison, plus solidement bâtie, une secousse que le fermier a comparée à celle d'un tremblement de terre. Elle avait, en franchissant la haie, déchiré et emporté la couronne des arbres les plus forts : vingt-cinq à trente arbres étaient renversés et couchés en sens divers, de manière à prouver que la trombe faisait son chemin en tournoyant. D'autres furent enlevés et accrochés, ainsi que plusieurs couronnes, au sommet des plus grands arbres (de 60 à 70 pieds de haut).

« Après ces premiers effets, la trombe parcourut une distance de deux lieues sans toucher à terre, en emportant de très grosses branches d'arbres, qu'elle vomissait à droite et à gauche avec bruit; arrivée à la pointe élevée du bois de Fanquembergue, elle y arracha de nouveau la tête de plusieurs chênes, que l'on vit passer avec elle au-dessus du

village de Vendôme, situé au pied de la colline, du côté est de la forêt.

« La trombe ne fit dans cette commune d'autre ravage que celui d'enlever avec sa racine un sycamore très gros, dans une prairie appartenant à M. Degrosciller; l'arbre fut retrouvé à la distance de six cents pas.

« Continuant sa route à la manière d'un boulet qui frappe la terre et se relève en ricochant, la trombe se porta au village d'Audinctau, où elle abattit la toiture de trois maisons et enleva plusieurs arbres, entre autres cinq ormes de très grande hauteur, tous cinq sortant d'une même souche.

« Au sortir de la vallée où sont situés ces derniers villages, la trombe s'éleva sur une montagne dite de Capelle. Plusieurs paysans, qui y labouraient, virent avec effroi ce phénomène extraordinaire traverser leurs habitations; ils craignirent bientôt pour eux-mêmes et n'eurent, pour échapper au danger, que le temps de se coucher, en se tenant fortement à leurs instruments aratoires. Ils remarquèrent avec étonnement que leurs chevaux étaient tristes, mais ne s'effrayèrent pas; le soc d'une de leurs charrues fut enfoncé dans la terre assez fortement pour résister aux efforts de trois chevaux; ils employèrent une pioche pour ne pas le casser.

« Ce fut par ces laboureurs, qui étaient placés sur la montagne, de manière à voir la trombe arriver et continuer sa route, que je parvins à connaître à peu près sa forme, sa grandeur et les éléments présumés qui pouvaient entrer dans sa composition. La forme était ovale; la longueur leur parut de trente pieds environ; l'autre diamètre pouvait en avoir vingt. La trombe tournait dans sa marche de manière à présenter successivement chacune de ses faces à tous les points de l'horizon. Il sortait de temps en temps, de son centre, des globes de feu, et souvent aussi des globes de vapeurs comme souffrées; les uns et les autres rejetaient, dans divers sens, des branches que le météore avait entraînées de très loin.

« Le bruit qu'il faisait dans sa marche rapide était semblable à celui d'une voiture pesante, courant au galop sur un chemin pavé. On entendait une explosion semblable à celle d'un fusil à chaque sortie d'un globe de feu ou de vapeur; le vent, qui était impétueux, joignait à ce bruit un sifflement terrible. Après avoir déchiré la terre et emporté tout ce qui lui résistait dans un certain point, la trombe s'élevait au-dessus du sol, pour aller à une lieue et quelquefois à deux lieues de distance recommencer ses ravages. C'est ainsi qu'en quittant le mont Capelle, et suivant toujours la même direction, elle alla enlever différentes meules de foin et beaucoup d'arbres à Bernin-Saint-Julien, distant d'une lieue de la montagne. De ce village à Witernestre, sur un intervalle de trois lieues, la trombe ne fit aucun ravage marquant; on reconnut

seulement sur la montagne qui sépare Harnu d'Étré-Blanche, un sillon de la largeur de trente pas, dans lequel le grain était détruit, dans une étendue de trente arpens de terre, placés au sommet.

» De là elle pénétra dans la vallée de Witerneestre et Lamhre. Le premier de ces villages, composé de quarante habitations, n'en conserva que huit intactes. Trente-deux maisons, avec leurs granges, furent renversées, et une énorme quantité d'arbres abattus, déchirés et emportés à une grande distance. On remarqua à Witerneestre que les pignons et les murs des maisons furent couchés d'une manière divergente de dedans en dehors.

» Le désastre ne fut pas moins considérable à Lamhre. Plusieurs personnes distinguèrent parfaitement la marche tournoyante du météore, sa couleur d'un brun soufre et le centre de feu ardent, d'où sortaient des éclats de vapeurs bitumineuses. Les arbres qui entouraient l'église furent cassés et déracinés; le mur et le toit de la maison du curé enlevés, et dix-huit maisons, la plupart bâties en briques, aspiées à leur fondation, avec le phénomène extraordinaire de l'écartement des murs renversés en dehors.

» Une circonstance heureuse, au milieu de ce grand désastre, c'est que personne n'a péri, pas même dans les deux derniers villages; un seul individu de Witerneestre a été grièvement blessé au bras par une poutrelle.

» En quittant Lamhre, la trombe se divisa; une partie se dissipa dans les airs; l'autre, qui ne paraissait plus qu'un nuage, chassée par un vent impétueux, venant du nord-ouest, se porta sur Lillers, bourg à trois lieues de Lamhre, où elle cassa et déracina près de deux cents arbres, dans la belle prairie de M. Desoulera : ensuite elle se dissipa à son tour. À trois heures le temps était calme, le ciel presque entièrement découvert, et le tonnerre, qui n'avait cessé de se faire entendre de tous les points de l'horizon, finit en même temps que la trombe. La soirée et la nuit suivante furent très belles.

Sur une trombe qui a été observée dans les environs de Trèves, le 25 juin 1829; décrite par M. le professeur Grossman.

» Vers deux heures de l'après-midi, une lieue au-dessous de Trèves, à l'est-nord-est de Ruwer et du Pfälzel, à environ 20^e au-dessus de l'horizon, un phénomène se montra, qui frappa d'étonnement et mit pendant une demi-heure dans une attente inquiète un grand nombre d'hommes qui étaient occupés au dehors.

» Le ciel, à la suite de la pluie qui venait d'avoir lieu, était encore couvert, lorsque, tout à coup, du milieu d'un nuage noir qui s'élevait de l'est-nord-est, une masse lumineuse commença à se mouvoir en sens contraire et à le déchirer violemment. Le nuage prit bientôt, vers le haut, la forme

d'une cheminée, de laquelle se serait échappée une fumée d'un gris blanchâtre, assez mêlée par intervalles de jota de flamme, et s'élevant par plusieurs ouvertures avec autant de force (ainsi s'exprimèrent un certain nombre de témoins) qu'elle avait été chassée avec la plus grande vivacité par plusieurs soufflets.

» Le météore était arrivé au-dessus des vignes de Dishurg et vis-à-vis Ruwer, lorsqu'à quelque distance plus au sud sur la rive droite de la Moselle, tout-à-fait en contact avec le sol, un nouveau météore, comme il sembla à plusieurs individus, apparut d'une manière effrayante; il dispersa des masses de charbon de terre entassées autour d'un arbre, renversa un ouvrier d'un four à chaux, qui se trouvait là, et se précipita à travers la Moselle avec un fracas épouvantable, comme si un grand nombre de pierres se hurlaient ensemble. L'eau s'élança en une haute colonne.

» Roulant avec le même fracas, ce dernier météore, toujours à terre, se dirigea de la Moselle à travers les campagnes de Falsel, laissant des traces évidentes de sa route en zig-zag à travers les champs de blé et de légumes. Une partie des légumes fut entièrement détruite, une autre partie couchée et hachée, le reste enlevé au loin dans les airs.

» Plusieurs femmes, près desquelles passa le météore, s'évanouirent; d'autres, plus éloignées, se cachèrent, au s'enfouirent en criant : Tous les champs sont en feu. Deux ouvriers, qui étaient montés sur un arbre, observèrent le météore dans tout son trajet; un autre eut même la pensée courageuse de la suivre, et cela était facile en marchant d'un pas ordinaire. Mais dans un des zig-zag qu'il décrivait, le météore l'enveloppa tout à coup. Il se sentit tantôt tiré en avant, tantôt violemment soulevé; il se pencha en s'appuyant fortement à terre avec ses outils; mais il n'en fut pas moins jeté à la renverse. Le tourbillon pourtant l'ahaudonna et continua sa route.

» Il ne se souvient d'aucune impression particulière qui aurait affecté soit l'odorat, soit le goût, mais seulement d'un bruit assourdissant. Il affirme qu'il y avait deux courants, dont l'un s'élevait obliquement, entraînant les tiges et les épis avec d'autres corps légers; l'autre avait une direction contraire.

» La route que le météore s'était frayée à travers les champs avait, suivant différents rapports, de 10 à 18 pas de largeur, sur une longueur de 2400 pas. Sa forme était à peu près conique. Sa couleur tantôt gris-blanc ou jaune, tantôt brun obscur; le plus souvent celle du feu. Le premier météore était en l'air au-dessus de celui-ci, à peu près parallèle, en avant vers le nord; il présente, pendant environ 18 minutes, une grande masse d'un gris blanchâtre, qui semblait souvent vomir de la fumée rouge de flamme, et qui, vue à la distance d'environ une demi-lieue, avait la forme d'un serpent de 140 pas

de long, dont la tête était vers le nord-nord-est, la queue à l'opposite.

« En 8 à 10 minutes de temps, la queue s'était échangée déjà en s'abaissant; au moment où elle allait toucher la tête, tout le phénomène disparut, et en même temps aussi le météore inférieur, sans que, ni de la partie élevée en l'air, ni, comme l'assure un témoin oculaire, de la partie inférieure, il y eût aucune explosion; mais alors une odeur de soufre très puante se répandit sur toute la campagne. Presque aussitôt un orage éclata sur les bois, situés au nord-nord-ouest du lieu, ou s'était montré le météore, et fut accompagné d'une grêle à grains extraordinairement gros.

« Le soleil ne parut point pendant tout ce temps, à ce qu'affirment la plupart des spectateurs. Il n'y avait aucun souffle de vent.

« Le météore supérieur fut aperçu de Gutweiler, Cossel, et autres endroits, comme aussi de Trèves; il paraît être descendu des hauteurs de Hochwald.»

Nous pourrions citer un assez grand nombre d'observations analogues faites sur divers points du globe. On appelle quelquefois *trombes marines* celles qui paraissent soit en pleine mer, soit près

des côtes : *trombes d'eau*, celles qui se montrent au-dessus des lacs et des rivières; puis *trombes d'air*, celles qui parcourent la terre avec plus ou moins de rapidité. Mais tout ce que l'on a pu recueillir sur ces différentes trombes, montre avec évidence qu'elles tiennent aux mêmes causes et qu'elles produisent les mêmes effets; c'est une seule et même puissance, qui tantôt s'exerce sur les eaux, pour en soulever des colonnes qui ont quelquefois jusqu'à 1000 ou 2000 pieds de hauteur, tantôt sur le sol, pour fouiller la terre, briser les arbres et enlever tous ces débris jusqu'aux nuages.

Comment cette puissance, quelquefois si prodigieuse, peut-elle prendre naissance au milieu des airs? C'est une question, il faut le dire, à laquelle la science ne peut faire aucune réponse précise. De toutes les conjectures vagues et hasardées que l'on peut faire sur l'origine de ce météore, la moins invraisemblable est peut-être celle qui le regarde comme un tourbillon d'une excessive intensité. Mais une discussion sur ce point nous semblerait prématurée; il faut multiplier les observations, et constater avec plus de précision toutes les circonstances de ces phénomènes.

CHAPITRE III.

DES VAPEURS ET DES SUBSTANCES MÉTÉORIQUES QUI TOMBENT DE L'ATMOSPHÈRE.

656. L'air atmosphérique est composé d'oxygène, d'azote et de quelques dix millièmes d'acide carbonique; ces éléments ont une grande mobilité mécanique, mais en même temps ils ont, en présence les uns des autres, une grande stabilité chimique, et s'ils existaient seuls, ils ne pourraient jamais éprouver de grandes secousses, ni produire des phénomènes météorologiques très variés. Les seules causes connues qui s'exerceraient alors pour les agiter et pour en troubler l'équilibre seraient le mouvement de rotation de la terre, les vagues soulevées sur les eaux, et les courans excités par la chaleur. Ces causes, quoique puissantes, se réduiraient sans doute à produire quelques brises légères, soit dans les régions équatoriales, soit dans les régions polaires ou tempérées. Ainsi tous les grands phénomènes atmosphériques que nous observons résultent des substances étrangères qui peuvent être, ou lentement accumulées, ou soudainement enlevées et suspendues dans les airs. Ces *substances météoriques* doivent donc être étudiées avec une attention particulière dans leur origine, dans leurs propriétés et dans les diverses apparences sous lesquelles elles peuvent se présenter.

Pour simplifier, autant qu'il est possible, une étude qui embrasse tant de questions difficiles, nous adopterons les divisions suivantes. Nous nous occuperons successivement

de l'hygrométrie,
du serain et de la rosée,
du givre et de la gelée,
des bruyons et des nuages,
de la pluie, de la neige, du grésil et du verglas,
des diverses substances météoriques et des aéro-lithes.

De l'hygrométrie.

657. Construction et usage des hygromètres.

L'hygrométrie a un double but, celui de mesurer la force élastique de la vapeur qui existe dans l'air, et celui de déterminer l'action que les divers corps de la nature peuvent exercer sur cette vapeur. Cette seconde partie offre nécessairement une foule de phénomènes qui ne peuvent être considérés ici que d'une manière générale; ainsi nous nous attacherons particulièrement à la première partie, qui présente une question nette et précise.

Tous les instrumens qui servent à mesurer la

force élastique de la vapeur contenue dans l'air se nomment des *hygromètres*; mais parmi ces instruments il faut distinguer ceux qui donnent immédiatement cette mesure et ceux qui ne la peuvent donner que d'une manière indirecte, et par des déductions plus ou moins incertaines. Les premiers peuvent être appelés *hygromètres de condensation*, parce que tous ceux qui sont connus jusqu'à présent reposent sur la condensation de la vapeur convenablement refroidie; les seconds peuvent être appelés *hygromètres d'absorption*, parce qu'ils reposent tous sur l'absorption de la vapeur au moyen de diverses substances.

658. *Hygromètres de condensation.* — Concevons un vase cylindrique en verre, plein d'eau, ayant ses parois parfaitement transparentes, nettes et bien essuyées; supposons qu'il soit placé sur un support ou sur une table dans un lieu dont la température est, par exemple, de 20°, et qu'il ait lui-même cette température. Tout le monde sait que, si l'eau contenue dans ce vase est graduellement refroidie à 19°, puis à 18° et à 17°, etc., il arrive un instant où la transparence est tout à coup troublée, et lorsqu'on regarde attentivement, on aperçoit que ce phénomène est dû à une rosée très fine qui s'est déposée sur les parois. Si le point-de-rosée (c'est ainsi que l'on appelle l'instant précis où la rosée commence à se déposer); si le point-de-rosée a lieu, par exemple, à 15°, c'est-à-dire, au moment où l'eau du vase atteint la température de 15°, on en conclut que la force élastique de la vapeur contenue dans l'air est de 13 millimètres, force élastique maximum pour la température de 15°; s'il a lieu à 12°, on en conclut que la vapeur a une force élastique de 11 millimètres, à 10°, une force élastique de 9 millimètres: en un mot, la force élastique de la vapeur contenue dans l'air est toujours la force élastique maximum correspondante à la température du point-de-rosée. En effet, la couche de gaz qui enveloppe les parois extérieures du vase se refroidit comme ces parois elles-mêmes, et tout en se refroidissant par leur contact, elle conserve son élasticité totale qui est mesurée par la hauteur du baromètre; mais, il y a plus, les deux éléments qui composent cette couche de gaz, savoir, l'air et la vapeur, conservent chacun leur élasticité partielle; or, à l'instant où cette vapeur commence à se condenser, elle a évidemment la force élastique maximum correspondante à la température de condensation. Donc, cette force élastique est celle qu'elle avait avant le refroidissement: c'est, par conséquent, la force élastique cherchée.

Tel est le principe simple et rigoureux sur lequel repose la construction des hygromètres de condensation. Tout se réduit à observer exactement la température du point-de-rosée et à chercher dans les tables la force élastique correspondante. Pour rendre ce principe encore plus facile à comprendre, et pour habituer l'esprit à en faire l'application,

nous reproduirons ici les tables de la force élastique de la vapeur d'eau, depuis —20 à 40°, qui sont à peu près les extrêmes de température entre lesquels se font toutes les observations hygrométriques.

Table de la force élastique de la vapeur d'eau depuis —20° à +40°.

Température.	Force élastique.	Température.	Force élastique.	Température.	Force élastique.
—20	1,3	11	10,1	26	24,4
—15	1,9	12	10,7	27	25,9
—10	2,6	13	11,4	28	27,4
—5	3,7	14	12,1	29	29,0
0	5,0	15	12,8	30	30,6
1	5,4	16	13,6	31	32,4
2	5,7	17	14,5	32	34,3
3	6,1	18	15,4	33	36,2
4	6,5	19	16,3	34	38,3
5	6,9	20	17,3	35	40,4
6	7,4	21	18,3	36	42,7
7	7,9	22	19,4	37	45,0
8	8,4	23	20,6	38	47,6
9	8,9	24	21,8	39	50,1
10	9,5	25	23,1	40	53,0

Ainsi, la force élastique de la vapeur contenue dans de l'air est 5 millimètres, quand le point-de-rosée est à 0°; elle est de 9,5 quand il est à 10°, de 17,3 quand il est à 20°, de 30,6 quand il est à 30°, etc. Et ces résultats sont complètement indépendants de la température ambiante; seulement, si elle est presque égale à la température du point-de-rosée, l'air sera presque saturé de vapeurs ou saturé d'humidité; et si, au contraire, elle surpasse de beaucoup celle du point-de-rosée, l'air sera très sec. Prenons un exemple; supposons que l'on ait fait quatre expériences:

La première, en hiver, par une température de 0°;

La deuxième, en printemps, par une température de 10°;

La troisième, en été, par une température de 30°;

La quatrième, en automne, par une température de 20°;

Que l'on ait constamment trouvé le point-de-rosée à 0°, on en devra conclure que, dans ces quatre expériences, l'air atmosphérique contenait la même quantité de vapeur, et que la force élastique de cette vapeur était de 5 millimètres. Mais, tout en contenant la même quantité de vapeur, l'air avait cependant des degrés d'humidité bien différents: dans le premier cas, il était très humide et presque saturé d'humidité; dans le deuxième cas, il était déjà très sec; dans le quatrième cas, excessivement sec; quant au troisième cas, c'est une sécheresse si grande que jamais peut-être l'on n'en a observé une pareille dans l'atmosphère. C'est ainsi que la comparaison des degrés d'humidité est tout autre chose que la comparaison des quantités de vapeur. En été, par 30° de température, l'air est sec, quand

le point-de-rosée est à 15 ou 20°, et, par conséquent, lorsque la quantité de vapeur contenue dans l'air est quatre ou cinq fois plus grande qu'elle n'est en hiver par un temps complètement humide.

Le vase en verre ou en cristal, qui vient de nous servir à démontrer le principe sur lequel reposent tous les hygromètres de condensation, n'est pas lui-même un hygromètre, bien qu'il puisse en tenir lieu. Il était important de lui donner une disposition qui pût en faire un véritable instrument météorologique, c'est-à-dire, un instrument portatif, facile à observer et exact dans ses indications. Ces conditions me semblent à peu près remplies dans les deux hygromètres suivans : l'un est l'*hygromètre à capsule* que j'ai fait construire il y a huit ou dix ans, mais dont je n'ai pas eu occasion de publier la description, bien qu'il ait paru très commode à quelques observateurs; l'autre est l'*hygromètre de Daniell*, dont on se sert beaucoup en Angleterre.

L'*hygromètre à capsule* est représenté dans la figure 778. Il se compose d'une capsule *cc'* et d'un thermomètre *TT'*. La capsule est en plaqué d'or extrêmement mince; elle a 4 ou 8 centimètres de diamètre, et 10 ou 12 millimètres d'élévation; elle porte une petite douille par laquelle on la fixe dans un petit bouchon d'ivoire *aa'*. Le thermomètre est scellé dans la douille; sa boule *t* est isolée au milieu de la capsule, et sa tige descend jusqu'au pied *tt'* de l'instrument. On y laisse un peu d'air pour que la colonne ne se divise pas; ce thermomètre, à la fois très délicat et très sensible, s'étend ordinairement depuis 0° à 30°; son échelle *tt'* est fendue dans sa longueur et portée par derrière une mince feuille d'ivoire transparente, contre laquelle le sommet de la colonne thermométrique devient parfaitement visible et tranché; c'est l'échelle elle-même qui porte le bouchon et la capsule.

Lorsqu'on veut faire l'expérience, on verse de l'éther sulfurique dans la capsule; la prompte évaporation donne un prompt refroidissement. On suit de l'œil le sommet de la colonne thermométrique, et en même temps on regarde la paroi nette et brillante de la capsule, afin de saisir l'instant précis où elle commence à se ternir; la température correspondante est celle du point-de-rosée. On pourrait écrire sur l'échelle les forces élastiques correspondantes aux divers degrés qu'elle porte.

L'exactitude de cet instrument repose sur l'identité presque parfaite qui existe entre la température de l'éther, celle du thermomètre et celle des parois de la capsule.

On conçoit que la boule du thermomètre doit être toujours complètement enveloppée d'éther.

De toutes les surfaces, celle de l'or brillant m'a paru la plus délicate pour montrer le point-de-rosée.

L'*hygromètre de Daniell* est représenté dans la figure 779. Il se compose d'un tube recourbé en *v* renversé, et terminé par deux boules, l'une *s* en verre noir, et l'autre *s'* en verre ordinaire. La boule

noire est à moitié pleine d'éther, et en outre elle contient un très petit thermomètre, dont la tige et l'échelle sont arrêtées dans l'intérieur du tube *t*. L'air est complètement chassé de l'appareil.

Pour faire l'expérience, on verse de l'éther sulfurique sur la boule *s'* qui est revêtue d'une toile fine, et l'on renouvelle l'opération jusqu'au moment où la rosée se dépose sur la boule noire. On note cet instant et la température précise que marque alors le petit thermomètre intérieur; cette température est celle du point-de-rosée.

Il est inutile de dire que le refroidissement de la boule noire est produit par la prompte évaporation de l'éther qu'elle contient, évaporation qui est elle-même produite par la condensation de la vapeur d'éther dans l'intérieur de la boule *s'* de plus en plus refroidie par l'évaporation qui se fait sur sa surface extérieure. On voit à côté de la fig. 779 un petit flacon très commode pour verser l'éther sur la boule *s'*, pendant tout le temps que dure l'opération.

Lorsqu'on a déterminé la force élastique de la vapeur par l'un des moyens précédens, l'on peut facilement trouver le *poids* total qui en est contenu dans un volume donné d'air; il suffit pour cela de se rappeler que la vapeur qui existe dans l'air possède exactement les mêmes propriétés de tension et d'élasticité que la vapeur qui existe dans le vide.

Ainsi, la formule que nous avons donnée (230, page 128) est exactement applicable au cas présent; et le tableau que nous avons formé (pag. 128) nous donne dans la colonne des densités le poids de vapeur d'eau contenue dans un centimètre cube d'air. Nous le reproduisons ici en le réduisant aux températures entre lesquelles sont comprises les observations hygrométriques; mais, pour le rendre d'une application plus facile, nous exprimerons le poids de vapeur contenu dans un *mètre cube* d'air; ce poids est évalué en grammes.

Tableau des poids de la vapeur qui est contenue dans un mètre cube d'air.

Température du point-de-rosée en degrés centig.	Force élastique correspondante en millimètres.	Poids de la vapeur contenue dans un mètre cube d'air en grammes.
—20	1,3	1,8
—15	1,9	2,1
—10	2,6	2,9
—5	3,7	4,0
0	5,0	5,4
1	5,4	5,7
2	5,7	6,1
3	6,1	6,5
4	6,5	6,9
5	6,9	7,3
6	7,4	7,7
7	7,9	8,2
8	8,4	8,7
9	8,9	9,2
10	9,5	9,7

Température du point-de-rosée en degrés centigr.	Force élastique correspondante en millimètres.	Poids de la vapeur contenue dans un mètre cube d'air en grammes.
11	10,1	10,3
12	10,7	10,9
13	11,4	11,6
14	12,1	12,3
15	12,8	13,0
16	13,6	13,7
17	14,5	14,5
18	15,4	15,3
19	16,3	16,2
20	17,3	17,1
21	18,3	18,1
22	19,4	19,1
23	20,6	20,2
24	21,8	21,3
25	23,1	22,5
26	24,4	23,8
27	25,9	25,1
28	27,4	26,4
29	29,0	27,9
30	30,6	29,4
31	32,4	31,0
32	34,3	32,6
33	36,2	34,3
34	38,3	36,2
35	40,4	38,1
36	42,7	40,2
37	45,0	42,2
38	47,6	44,4
39	50,1	46,7
40	53,0	49,2

On voit par ce tableau que, entre 0° et 20°, le nombre qui exprime en millimètres la force élastique de la vapeur est aussi celui qui exprime en grammes le poids de vapeur contenue dans un mètre cube d'air. Ainsi, lorsqu'on trouve le point-de-rosée à 10°, la force élastique de la vapeur est de *neuf millimètres et cinq dixièmes*; et le poids de cette vapeur qui est contenu dans un mètre cube d'air, est de *neuf grammes et sept dixièmes*. Il est facile de se rendre compte de cette particularité, en remontant à la formule (230), car elle devient

$$s = r \cdot \frac{(1 + 0,068t)}{(1 + \alpha t)}$$

r désignant le nombre des grammes d'eau contenues dans un mètre cube d'air;

r , la force élastique de cette vapeur évaluée en millimètres et déterminée par le point-de-rosée;
 t , la température ambiante.

Or, comme le facteur qui multiplie r est toujours très peu différent de l'unité, on a à très peu près

$$s \approx r.$$

650. *Hygromètres d'absorption.* — Il y a un grand nombre de corps qui absorbent, avec plus ou moins d'avidité, la vapeur d'eau qui existe dans l'air, et

comme ce même temps ils éprouvent quelques changements dans leurs dimensions, dans leur poids ou dans quelques autres de leurs propriétés, l'on a essayé de prendre ces changements eux-mêmes pour la mesure des quantités de vapeurs absorbées.

De tous les hygromètres qui sont construits d'après les changements de dimension que la vapeur produit dans différents corps, nous n'en décrirons qu'un seul, l'*hygromètre à cheveu*, que l'on appelle aussi l'*hygromètre de Saussure*, du nom de son illustre inventeur.

L'*hygromètre à cheveu*, dans sa forme la plus simple, est représenté dans la figure 780. Le cheveu est fixé par son extrémité supérieure à une pince p , qui peut éprouver de légers déplacements on moyen de la vis v et du ressort a ; il s'enroule par son extrémité inférieure sur une poulie à deux gorges, dont l'axe porte une aiguille a destinée à parcourir le cadran c .

Dans la seconde gorge de la poulie est enroulé un fil de soie portant un petit contrepois q destiné à donner au cheveu une tension continue et toujours égale.

Voici maintenant le jeu de l'instrument. Quand l'air qui enveloppe le cheveu devient plus humide, le cheveu absorbe une nouvelle quantité d'humidité, il s'allonge, le contrepois fait tourner la poulie, et l'aiguille marche vers le point n du cadran; au contraire, quand l'air devient plus sec, le cheveu perd une partie de son humidité; il se sèche lui-même, se raccourcit, entraîne le contrepois, fait tourner la poulie, et l'aiguille marche vers le point s du cadran. Ces effets sont très prompts; il est facile de voir, par exemple, que le soufflé de l'haleine détermine un grand mouvement dans l'aiguille.

Les indications que l'on peut tirer de l'hygromètre à cheveu reposent sur les deux principes suivants :

1°. Dans la *sécheresse extrême*, le cheveu prend toujours le même degré de raccourcissement, c'est-à-dire que l'aiguille finit toujours par s'arrêter au même point s du cadran, quelle que soit la température; ce point s est le point de la sécheresse extrême.

2°. Dans l'*humidité extrême*, le cheveu prend toujours le même degré d'allongement, c'est-à-dire que l'aiguille finit toujours par s'arrêter au même point n , quelle que soit la température; ce point n est le point de l'humidité extrême.

Pour la même cheveu, l'intervalle compris entre les points extrêmes s et n est toujours le même, et le mouvement de la pince supérieure p sert à changer un peu la longueur du cheveu, pour amener ces points sur le cadran, si naturellement ils n'y tombaient pas, ce qui pourrait bien arriver.

Nous allons en même temps démontrer ces principes par l'expérience, et faire la graduation de l'instrument. On met l'hygromètre sous une cloche;

on y fait le vide, ou bien on y laisse l'air, mais dans l'un ou l'autre cas on en absorbe toute l'humidité, soit avec l'acide sulfurique concentré, soit avec du chlorure de calcium bien calciné, et l'on observe le point où s'arrête l'aiguille; ce point est marqué zéro sur le cadran; c'est le point de sécheresse extrême, car l'expérience répétée plusieurs fois à des températures différentes, donne très sensiblement le même résultat. Il faut quelquefois plusieurs jours pour que l'aiguille cesse complètement de marcher au sec.

Ensuite on porte l'hygromètre sous une cloche dont on a mouillé les parois avec de l'eau distillée, la cloche elle-même repose sur un plateau au fond duquel on a répandu quelques lignes d'eau, et l'on abandonne l'expérience à elle-même. L'aiguille marche rapidement vers le point zéro vers l'humidité, et enfin elle s'arrête; son point d'arrêt est le même, soit que la température ambiante soit 0°, 10°, 20° ou même 30°; c'est le point d'humidité extrême. On y marque 100; l'arc compris sur le cadran en 0 et 100 est ensuite divisé en 100 parties égales, et chacune de ces parties est ce que l'on nomme un *degré d'humidité*.

Pour que l'hygromètre soit bien comparable à lui-même, c'est-à-dire pour qu'il marque exactement le même degré dans les mêmes circonstances, il faut que le cheveu ait été choisi avec beaucoup de soin. Pour cela on prend plusieurs cheveux, dont chacun soit égal, uni et homogène autant que possible; on les soumet à une légère lessive alcaline à peine tiède; on les sèche; on les examine de nouveau, et l'on choisit enfin ceux qui paraissent offrir l'homogénéité la plus complète dans toute leur étendue. Malgré ces précautions, il est rare d'obtenir dans ces hygromètres une marche bien constante, et, de plus, ils s'altèrent avec une telle rapidité qu'après un en il est presque indispensable de renouveler le cheveu.

D'après tout ce que nous venons de dire, l'hygromètre à cheveu ne nous donne encore que le moyen de comparer les divers degrés d'humidité; il nous permet de dire que l'air est à 60, à 80 ou à 100 degrés d'humidité; mais il ne nous dit rien sur la force élastique de la vapeur que cet air contient, et par conséquent il ne résout pas la question fondamentale qui fait l'objet de l'hygrométrie. Il faudrait pour cela déterminer quelle est la force élastique de la vapeur qui correspond à chacun des degrés de l'hygromètre à cheveu, et cette détermination est très difficile, parce qu'il est évident que si cet hygromètre marque, par exemple, 80° d'humidité quand la température est zéro, et 80° d'humidité quand la température est de 30°, les forces élastiques correspondantes à cette même indication de l'instrument ne sont certainement pas égales. On est donc obligé de réduire la question, et c'est ce qu'a fait M. Gay-Lussac; il a cherché quelles étaient les forces élastiques de la vapeur correspondante aux divers degrés que marque

l'hygromètre à cheveu pour une température déterminée, et il a choisi la température de 10°. Nous rapporterons ici quelques-uns de ses résultats les plus utiles dans les observations météorologiques.

Quand l'hygromètre à cheveu marque 100 degrés, la force élastique de la vapeur est au *maximum*, c'est-à-dire 9,5 millimètres.

Pour 90 degrés, elle est à peu près les $\frac{4}{5}$ de son *maximum*, ou 7,6 millimètres.

Pour 80 degrés, elle est à peu près les $\frac{2}{3}$, ou 6,4 millim.

Pour 70 degrés. la moitié, ou 4,7 mm.

Pour 60 degrés. $\frac{1}{3}$, ou 3,2 millim.

Pour 50 degrés. $\frac{1}{4}$, ou 2,4 millim.

Pour 40 degrés. $\frac{1}{5}$, ou 2 millim.

Pour 30 degrés. $\frac{1}{7}$, ou 1,3 millim.

Il est excessivement rare de voir l'hygromètre tomber à 30°.

J'ai rapporté les expressions de la force élastique correspondante aux divers degrés en fraction de la force élastique *maximum*, parce qu'il est bien probable que les nombres obtenus par M. Gay-Lussac pour la température de 10° s'entendent au moins aux températures voisines; et il est bien probable par conséquent que l'on ne commettrait pas une grande erreur en appliquant ces résultats à la température de 30°, c'est-à-dire que pour cette température les forces élastiques de la vapeur sont sans doute à peu près :

les $\frac{4}{5}$, les $\frac{2}{3}$, le $\frac{1}{2}$, le $\frac{1}{3}$, le $\frac{1}{4}$, le $\frac{1}{5}$ ou le $\frac{1}{7}$

de la force élastique *maximum*, 17,3 millimètres, suivant que l'hygromètre à cheveu marque

90, 80, 70, 60, 50, 40, ou 30 degrés.

Malgré le travail important de M. Gay-Lussac sur ce sujet, l'hygromètre à cheveu ne peut donner que des approximations sur la force élastique de la vapeur contenue dans l'air, parce qu'il est par sa nature un instrument trop irrégulier dans sa marche, et soumis à trop d'incertitudes.

Cependant on doit convenir qu'il est peut-être encore le moins inexact des nombreux hygromètres que l'on a construits en prenant pour principe le changement de dimensions causé par l'absorption de la vapeur. Avant de choisir le cheveu, on avait

employé une foule de substances organiques : du parchemin, des peaux diversement préparées, des rubans de balais, etc.; on avait eu recours aussi au changement de volume ou de capacité; on avait mis du mercure dans des plumes à écrire, dans des vessies de souris, etc., et l'on observait dans un tube étroit les mouvemens d'ascension ou de dépression du mercure, suivant que la capacité devenait plus grande par l'humidité ou plus resserrée par la sécheresse. Mais toutes ces inventions sont maintenant abandonnées.

De tous les hygromètres que l'on a imaginés en prenant pour principe les changemens de poids ou les changemens de propriété produits dans les corps par l'absorption de la vapeur, il n'en est aucun qui ne soit trop inexact pour que nous puissions en recommander l'usage. Les changemens de poids peuvent sans doute être mesurés avec une grande précision, soit avec la balance ordinaire, soit au moyen de la force de torsion des fils de métal; mais ils sont si petits, que les parcelles de poussière qui sont toujours flottantes dans l'air peuvent produire une grande altération dans les résultats, et de plus, la graduation de ces instrumens pour arriver à la force élastique de la vapeur est excessivement difficile. Ainsi les éponges imprégnées de différens sels, les flocons ou les toiles de coton, les rondelles de papier, et tous les corps analoges qui sont plus légers ou plus lourds, suivant que l'air est plus sec ou plus humide, ne peuvent donner que des indications tout-à-fait infidèles.

Parmi les changemens de propriété, celui qui a été employé le plus souvent pour la construction des hygromètres est la torsion des cordes à boyau ou des cordes de chanvre ou de coton, et la torsion de quelques fibres végétales, comme la barbe de blé; mais tous ces instrumens paraissent encore plus mauvais que les précédens.

660. Nous avons dit au commencement que l'hygrométrie a aussi pour objet de déterminer les actions que les différens corps peuvent exercer sur la vapeur d'eau. Cette seconde question comprend une foule de phénomènes, dans le détail desquels nous ne pouvons entrer. La plupart des corps organiques ou inorganiques peuvent contenir avec leurs autres élémens une certaine quantité d'eau qui n'est point essentielle à leur nature chimique; s'ils sont exposés dans un espace parfaitement sec, ils perdent une portion de cette eau accidentelle, et ils en perdent d'autant plus, que la température est plus élevée; s'ils sont exposés ensuite dans un espace plus ou moins humide, ils en absorbent la vapeur avec plus ou moins d'avidité; ils la liquéfient; ils la dispersent dans toute l'étendue de leur masse, et reprennent ainsi un poids plus ou moins grand et des propriétés plus ou moins analogues à celles qu'ils avaient d'abord. Cet état d'équilibre entre la quantité d'eau que peut retenir un corps

et l'humidité de l'atmosphère qui l'entoure repose sur le principe suivant :

Quand l'eau se trouve combinée avec des substances étrangères, elle conserve encore la propriété d'émettre des vapeurs; mais à température égale, la force élastique de ces vapeurs est toujours moindre que celle des vapeurs qui se forment sur de l'eau pure.

Pour démontrer ce principe fondamental, il suffit de faire passer dans le vide barométrique de l'eau pure et de l'eau tenant en dissolution diverses substances. On obtiendra une dépression de la colonne barométrique, et par conséquent une mesure de la force élastique de la vapeur qui se forme; mais, à température égale, la dépression sera toujours moindre pour les dissolutions que pour l'eau pure. Par exemple, à 10° de température, M. Gay-Lussac a trouvé les résultats suivans :

Nature des dissolutions.	Densités des dissolutions à 10° cent.	Tensions des dissolutions à 10°
Eau.	1,000	9,5
Muriate de soude	1,006	8,6
Id.	1,163	7,8
Id.	1,205	7,2
Muriate de chaux	1,274	6,3
Id.	1,343	4,8
Id.	1,397	3,6
Acide sulfurique	1,493	1,7
Id.	1,541	1,2
Id.	1,702	0,2
Id.	1,848	0,0

Or, si la vapeur qui se forme, par exemple, sur l'eau salée à 10° ne peut atteindre, qu'une force élastique de 7 millimètres, qu'arriverait-il si l'on mettait en contact à 10° de l'eau salée avec de la vapeur ayant une force élastique plus grande que 7 millimètres? Ce qui arrive dans ce cas est digne de remarque: l'eau salée absorbe de la vapeur au lieu d'en émettre, et elle en absorbe jusqu'au moment où la force élastique de la vapeur, qui repose sur elle, est réduite à 7 millimètres. On peut démontrer ce résultat en faisant passer un grain de sel dans le baromètre qui contient de l'eau pure et de la vapeur au-dessus d'elle; à mesure que la sel se dissout dans l'eau, le baromètre remonte, c'est-à-dire que la force élastique de la vapeur qui préexistait ne peut plus se soutenir en présence de l'eau salée; il faut qu'elle retombe à la valeur qu'elle aurait prise en se formant sur l'eau salée elle-même.

Ainsi, tandis que l'eau pure a seulement la propriété d'émettre des vapeurs, une dissolution a la propriété d'en émettre ou d'en absorber, suivant que la tension de la vapeur qui repose sur elle est plus petite ou plus grande que la tension de la vapeur qui tend à se former.

Ce qui arrive aux dissolutions arrive aussi aux corps solides qui contiennent de l'eau accidentelle, c'est-à-dire de l'eau dont ils peuvent être privés sans que leurs autres élémens se désunissent; les

corps absorbent ou émettent les vapeurs dans l'atmosphère qui les entoure, suivant que la tension des vapeurs déjà existantes dans cette atmosphère est plus grande ou moindre que la tension des vapeurs qui tendent à se former.

Voilà pourquoi les corps hygrométriques, comme le cheveu, arrivent toujours au même degré de saturation quand ils sont plongés dans de l'air qui est lui-même saturé d'humidité; car la tension de la vapeur qui tend à se former sur ces corps, est toujours moindre que la tension de la vapeur qui existe alors autour d'eux, et il y a absorption jusqu'à saturation.

Ces mêmes principes s'appliquent à un grand nombre d'opérations industrielles, particulièrement à celles qui ont pour objet de concentrer des dissolutions par la température ambiante, comme il arrive dans les salines; car en exposant ces dissolutions à l'air, il est bien possible qu'on les étende au lieu de les concentrer; c'est ce qui aura lieu, par exemple, à 10° de température, si elles ont une densité de 1,205, et si l'hygromètre à cheveu marque 90° d'humidité.

Du serain et de la rosée.

661. *Du serain.* — Le serain est une petite pluie fine qui tombe quelquefois sans que l'on aperçoive aucun nuage au ciel. Dans nos climats, ce phénomène se manifeste seulement pendant l'été, et presque toujours au coucher du soleil; on l'observe surtout dans les vallées ou dans les plaines basses, à une petite distance des lacs et des rivières; il est beaucoup plus rare dans les lieux élevés. Une pluie sans nuage semble d'abord un phénomène impossible; mais il suffit d'un instant de réflexion pour en voir la possibilité et même pour en concevoir la cause.

Pendant la chaleur du jour, tous les corps humides donnent une grande quantité de vapeurs, qui se répandent dans l'air sans en troubler la transparence; supposons, pour un instant, que vers cinq ou six heures de l'après-midi la température de l'air atmosphérique soit, par exemple, de 20°, et que la force élastique de la vapeur qu'il contient soit de 13 millimètres, alors le soleil continuant de s'approcher de l'horizon, la température ambiante s'abaisse de plus en plus, sans que la force élastique de la vapeur éprouve de changement; et quand cet abaissement arrive à 14 ou 15°, la vapeur ne peut plus exister en totalité, puisqu'elle aurait une force élastique plus grande que le maximum qui convient à cette température; il faut donc qu'elle se condense en partie; c'est cette condensation qui produit le phénomène du serain. On voit donc qu'il dépend de deux éléments, savoir, de la température ambiante et de la force élastique de la vapeur qui existe dans l'air; et la condition de sa formation est que la température s'abaisse au-dessous de celle qui convient à la force élastique de la vapeur.

En déterminant le point de rosée avec un hygro-

mètre, et en suivant avec un thermomètre la loi du refroidissement de l'air, on pourrait prédire à peu près l'instant où le serain doit paraître, et indiquer son intensité.

662. *Rosée.* — Tous les phénomènes de la rosée ne sont que des conséquences des lois de l'hygrométrie et des lois du rayonnement nocturne. C'est le docteur Wells qui a le premier découvert et développé ces conséquences dans une série d'expériences ingénieuses qui remontent à peu près à l'année 1800. Son ouvrage sur la rosée fut couronné en 1816 par la Société royale de Londres.

Pendant les nuits calmes et seraines, l'air atmosphérique et tous les corps dispersés sur la surface de la terre se refroidissent par leur rayonnement vers les espaces célestes (pag. 513); mais ce refroidissement est inégal, parce qu'il dépend du pouvoir rayonnant des corps, de leur conductibilité et de leur situation par rapport aux objets environnants. Dans les circonstances les plus favorables, un corps peut tomber à 8 ou 10° au-dessous de la température de l'air; c'est ce que le docteur Wells a constaté par un grand nombre d'expériences. Ainsi, pendant une belle nuit d'été, l'observateur qui parcourrait une plaine pour observer avec un thermomètre très sensible la température du sol et des divers objets dont il est couvert, trouverait infailliblement de très grandes différences dans ces températures; les couches inférieures de l'air étant, par exemple, à 12°, il trouverait dans quelques endroits le sol ou le gazon à 2 ou 3° seulement, d'autres corps seraient à 5 ou 6°, d'autres à 8 ou 10, et plusieurs seraient sans doute à une température plus haute que celle de l'air. Ce fait fondamental une fois établi, l'explication de la rosée et de tous ses accidents ne présente plus aucune difficulté.

Admettons pour un moment que la force élastique de la vapeur qui existe dans l'air soit de 7 millimètres; comme cette force élastique est le maximum correspondant à 5° de température, il est évident que tous les corps terrestres qui sont au-dessous de 5° auront condensé les couches de vapeurs qui sont venues en contact avec eux, et qu'ils seront par conséquent plus ou moins couverts de rosée. Au contraire, tous les corps qui ont conservé une température plus haute que 5° resteront parfaitement secs, puisque l'air humide qui les touche n'aura pas été refroidi jusqu'au point où la vapeur est forcée de se condenser.

Ainsi, en dernier résultat, pendant les nuits calmes et seraines, tous les corps terrestres doivent être assimilés à l'hygromètre à capsule ou à l'hygromètre de Daniel, c'est-à-dire que s'ils se refroidissent au-dessous du point-de-rosée, ils se couvrent de vapeurs condensées, et dans le cas contraire, ils restent secs. La seule différence est que les parois des hygromètres se refroidissent par l'évaporation de l'éther, tandis que la surface du sol et tous les corps terrestres se refroidissent par leur rayonnement vers les espaces célestes. Mais

ces deux causes différentes produisent ici le même effet, puisque la condensation de la vapeur n'est qu'une conséquence de l'abaissement de température.

Pour étudier en détail tous les phénomènes de la rosée, il suffit donc de rechercher toutes les causes qui peuvent modifier le refroidissement des corps et le rayonnement de la nuit. C'est ce que nous allons essayer de faire d'une manière générale.

Influence de la situation. — Pour mieux faire comprendre l'influence de la situation sur le refroidissement nocturne, imaginons qu'en milieu d'une vaste plaine on ait élevé une espèce de tente avec des cadres légers ayant chacun une toise carrée; ces cadres seraient, par exemple, recouverts de toile ou même de papier, quatre seraient placés verticalement, et le cinquième placé horizontalement au-dessus fermerait l'espace. Un corps placé sur le sol au milieu de la tente rayonnerait de toutes parts; mais ses rayons calorifiques, arrêtés par les parois, lui seraient renvoyés par elles, et son refroidissement sera très lent.

Si l'on enlève la cloison supérieure, le corps verra le zénith; il rayonnera vers les espaces célestes, et son refroidissement deviendra plus rapide.

Si l'on enlève une des parois latérales, le corps verra encore une plus grande étendue du ciel, et son refroidissement deviendra encore plus rapide. Il en sera de même à mesure qu'on le découvrira de plus en plus pour qu'il voie une étendue du ciel de plus en plus grande.

Les murs, les édifices, les arbres, les collines font sur le rayonnement nocturne un effet analogue à celui des cloisons que nous avons prises pour exemple, et, d'après ce principe, il suffira de voir l'exposition d'un objet pour juger d'avance s'il doit se refroidir plus ou moins qu'un autre objet semblable qui voit le ciel sous un autre aspect.

Influence de la nature des corps. — Les surfaces qui ont un pouvoir émissif se refroidissent plus promptement que les autres; mais l'épaisseur des corps, leur conductibilité et l'inclinaison de leurs surfaces sont autant de circonstances qui modifient la vitesse du refroidissement.

Influence du vent. — L'agitation de l'air est toujours un obstacle à la formation de la rosée, parce qu'en se renouvelant rapidement à la surface des corps, il leur rend une partie de la chaleur qu'ils perdent par le rayonnement; aussi, par un grand vent, la température de tous les corps est sensiblement la même que la température de l'air.

Influence des brouillards et des nuages. — Quand le ciel est couvert, l'échange de chaleur s'établit entre les nuages et la surface de la terre; la nappe des nuages devient comme la toile des cadres dont nous parlions tout à l'heure; elle empêche que les objets ne rayonnent vers le ciel, et ralentit le refroidissement. On avait remarqué depuis long-temps que les nuits couvertes sont toujours moins froides que les nuits serénées; le professeur Wilson avait

reconnu qu'un thermomètre exposé à l'air libre pendant une nuit alternativement claire et nuageuse s'élève toujours quand l'air s'obscurcit, et retombe dès que les nuages disparaissent (*Trans. philos.*, 1771).

Les brumes ou les brouillards produisent un effet encore plus marqué que les nuages, parce que la chaleur rayonnante qui émane des corps à la température ordinaire n'a pas la propriété de traverser un air qui n'est pas parfaitement transparent.

Du givre et de la gelée.

663. Le givre ou la *gelée blanche* s'observe dans nos climats pendant les fraîches matinées du printemps et de l'automne. Sa cause est la même que celle de la rosée, car le givre n'est autre chose que de la rosée congelée. Quand le ciel est serein, l'air calme et humide, et que la température de la nuit est seulement de 4 ou 5° au-dessus de zéro, certains corps peuvent tomber par le rayonnement à une température plus basse que zéro, et alors les gouttelettes de rosée dont ils se sont d'abord couverts cristallisent en petites aiguilles qui s'entre-lacent de mille manières. L'exposition a peut-être plus d'influence encore sur la formation du givre que sur celle de la rosée, parce qu'une fois que les corps sont revêtus d'une couche de rosée suffisamment épaisse, ils ont le même pouvoir rayonnant, et leur refroidissement ultérieur s'accomplit suivant les mêmes lois.

664. Les gelées d'automne, et surtout les gelées de printemps, qui sont quelquefois si funestes aux récoltes, ont aussi pour cause principale l'influence du rayonnement de la nuit. Elles sont accompagnées de givre quand l'air est humide, mais elles peuvent avoir lieu sans aucune apparence de gelée blanche ni même de rosée; il suffit pour cela que l'air soit sec, c'est-à-dire, que la force élastique de la vapeur qu'il contient soit moindre que 2 ou 3 millimètres. Toutes les circonstances qui favorisent la formation de la rosée et du givre sont par conséquent celles qui favorisent la gelée, et réciproquement tous les moyens qui peuvent retarder la formation du givre ou de la rosée peuvent retarder ou même empêcher la gelée. Ainsi une simple gaze étendue au-dessus des plantes délicates est très souvent une précaution suffisante pour les garantir d'un refroidissement meurtrier. La fumée serait un moyen tout aussi efficace. D'où s'agit pas de réchauffer les plantes que l'on veut conserver, il faut seulement les empêcher de se refroidir par le rayonnement. C'est d'après ce principe qu'il faut, suivant les localités, combiner les moyens de conservation.

Un exemple fera mieux comprendre encore toute l'efficacité du rayonnement pour refroidir les corps pendant la nuit, et c'est dans cette vue que nous indiquerons ici le procédé que l'on a imaginé depuis long-temps pour faire de la glace au Bengale. Voici le compte que M. Williams en a rendu dans le

LXXXIV^e vol. des *Transactions philosophiques*; la *manufacture* dont il parle occupe trois cents personnes.

Un terrain bien nivelé et d'une étendue convenable est divisé en petits carrés de 4 à 5 pieds de côté, entourés d'un petit rebord de terre de 4 ou 5 poices de hauteur. Dans ces compartimens, couverts de paille ordinaire ou de cannes à sucre sèches, en place autant de terrines remplies d'eau qu'ils peuvent en contenir. La glace se produit abondamment quand l'air est calme et le ciel serein; les nuages et le vent empêchent sa formation. M. Williams a reconnu par l'expérience que la température de l'air ambiant est presque toujours de plusieurs degrés au-dessus de zéro, et une fois le thermomètre, placé sur la paille à côté des terrines, ne descendit pas au-dessous de 5°, 6°, tandis que la glace se formait rapidement et prenait beaucoup d'épaisseur.

On a élevé dans la plaine de Saint-Onen, auprès de Paris, une fabrique de glace qui repose sur les mêmes principes. Il suffit que la température de l'air descende à 2 ou 3° au-dessus de zéro pour que l'on obtienne des lames de glace assez épaisses.

Des brouillards et des nuages.

665. Les brouillards se forment dans l'air humide quand la force élastique de la vapeur est plus grande que la force élastique *maximum* correspondante à la température de l'air. La fumée qui s'élève au-dessus d'un vase rempli d'eau chaude est un véritable brouillard; l'air étant, par exemple, à 20°, et l'eau à 60°, la vapeur se forme avec une force élastique de 144 millimètres, qui est celle qui correspond à 60°; mais comme elle ne peut pas exister avec cette force élastique à une température de 20°, il faut bien qu'elle se condense en partie jusqu'à ce que sa force élastique soit réduite à 17 millimètres, qui est celle qui correspond à 20° de température. Le brouillard sera donc d'autant plus intense que la température de l'eau sera plus élevée au-dessus de la température de l'air, et que l'air sera lui-même plus humide, puisque, s'il était saturé, il faudrait que toute la vapeur nouvelle se condensât à mesure qu'elle arrive.

Les brouillards qui se forment sur la mer, les lacs, les fleuves et les rivières ont précisément la même origine : plusieurs observateurs se sont assurés, par des expériences directes, qu'au moment de la formation des brouillards la température de l'air est toujours moindre que la température de l'eau. Cependant cette condition, qui est toujours nécessaire, n'est pas toujours suffisante : quand l'air est sec et fort agité, il emporte la vapeur et la disperse à l'instant où elle se forme, sans qu'il en résulte une condensation sensible; mais quand l'air est calme et déjà humide, la vapeur s'élève lentement, et se condense presque en totalité; c'est précisément ce qui arrive auprès de toutes les sources pendant l'hiver.

On observe assez souvent des brouillards dans des circonstances qui semblent tout-à-fait différentes. Par exemple, au moment du dégel, quand la température de l'air est très sensiblement plus haute que la température de l'eau, on voit encore des brouillards très intenses se former sur les rivières, même quand elles sont encore couvertes de glaces; mais les apparences seules sont changées : le principe est le même. En effet, dans ce cas l'air chaud est saturé d'humidité, et lorsqu'il vient se mêler à l'air qui a été refroidi par le contact de la glace ou par le contact des autres corps froids, sa vapeur se condense.

C'est la même cause encore qui produit les brouillards sur les rivières pendant l'été, après les pluies d'orage. L'air est plus chaud que la surface de l'eau, mais il est saturé d'humidité, et dès qu'il approche des lieux où la fraîcheur de la rivière se fait sentir, il faut bien que sa vapeur se condense, puisqu'elle se refroidit.

En général, le mélange de deux airs saturés d'humidité et inégalement chauds produit essentiellement du brouillard, parce que la moyenne température qui en résulte est trop basse pour contenir la moyenne force élastique de la vapeur. Par exemple, de l'air saturé d'humidité à 5° se mêle à de l'air saturé d'humidité à 15°. La température moyenne sera 10°; mais la force élastique qui correspond à 5° est 7 millimètres, celle qui correspond à 15° est 13 millimètres; la force élastique moyenne est 10 millimètres, qui ne peut exister dans de l'air à 10°, puisque le maximum de force élastique correspondant à cette température est seulement de 9 millimètres.

666. Les nuages ne sont autre chose que des amas de brouillards plus ou moins épais, suspendus à diverses hauteurs dans l'atmosphère, quelquefois immobiles, et le plus souvent emportés par des courans d'air ou par des vents impétueux. Tous les brouillards qui se forment à la surface de la terre, dans les lieux humides, au fond des vallées, sur les collines, autour des pics élevés ou des cimes neigeuses, deviennent des nuages lorsqu'ils sont entraînés par les vents sans être dispersés. Mais les nuages peuvent avoir aussi une autre origine : ils peuvent se former directement au milieu des airs, soit par la rencontre de deux vents humides inégalement chauds, soit par la condensation des vapeurs, lorsqu'elles s'élèvent en abondance dans des régions qui sont trop froides pour les contenir à l'état élastique.

On admet, en général, que les vapeurs qui constituent les nuages sont des *vapeurs vésiculaires*, c'est-à-dire, des amas de petits globules remplis d'air humide, tout-à-fait analogues aux bulles de savon. Ces globules se distinguent très bien à l'œil nu, dans les brouillards qui s'élèvent sur l'eau chaude, et particulièrement sur la surface d'une dissolution noire comme le café. Leur densité est essentiellement plus grande que celle de l'air, à

cause de la pellicule liquide qui forme leur enveloppe, et il est assez difficile d'expliquer comment ils peuvent, malgré cet excès de densité, rester suspendus au milieu des airs. M. Gay-Lussac pense que les courans d'air chaud qui s'élèvent incessamment de la terre pendant le jour ont une grande influence pour déterminer l'ascension et maintenir la suspension des nuages. M. Fresnel supposait que la chaleur solaire, absorbée dans le sein des nuages, en forme des espèces de montgolifères qui s'élèvent à des hauteurs d'autant plus grandes que l'excès de température est plus considérable. Ces deux causes sont sans doute très efficaces, mais nous avons jusqu'à présent trop peu de données sur la véritable constitution des nuages et sur les propriétés des vapeurs ou des élémens divers qui les composent pour tenter une explication complète de ce phénomène. Nous ne pourrions, à plus forte raison, présenter que des conjectures plus ou moins hasardées sur les causes qui déterminent la forme des nuages, leur étendue, leur élévation, leur couleur et toutes leurs apparences si variées, dont les météorologistes doivent faire une étude toute particulière.

De la pluie, de la neige, du grésil et du verglas.

667. La quantité de pluie qui tombe annuellement sur un même point de la terre est un élément météorologique dont la détermination est très importante. Les instrumens qui servent à cet usage sont appelés *uromètres*; quelques observateurs les nomment *pluimètres*. La figure 781 représente l'uromètre ordinaire : c'est un cylindre en cuivre de 6 ou 8 pouces de diamètre; il se compose d'un récipient *cc'* et d'un réservoir *ss'*. Le récipient porte un fond conique percé d'une ouverture *s*; il s'ajuste à mouvement de balonnète sur le réservoir *ss'*. Au fond de celui-ci s'ouvre un tube coudé *r* qui se relève le long de la paroi extérieure; là il reçoit un tube de verre *vv'*, qui est divisé en parties égales et qui sert à indiquer la hauteur du liquide intérieur. On mesure exactement la surface du récipient *cc'*; on jauge le réservoir *ss'* pour connaître la quantité de liquide qui correspond aux diverses divisions du tube *vv'*, et il est facile ensuite d'en déduire la quantité de pluie, c'est-à-dire, l'épaisseur de la couche qu'elle aurait formée dans un vase à fond plat et horizontal.

L'uromètre de l'Observatoire de Paris est représenté dans la figure 781 *bis*. Le récipient est en *cc'*, le réservoir en *ss'*, l'eau tombe du récipient dans le réservoir au moyen du tube *r*; un peu au-dessous du réservoir est une cuvette cylindrique, jangée avec soin, et portant sur sa paroi intérieure des divisions qui indiquent en centimètres la hauteur du liquide. Le récipient a 76 centimètres de diamètre et la cuvette 24 centimètres, de telle

sorte que sa surface est la dixième partie de celle du récipient. On emploie aussi de petits vases gradués pour mesurer les petites fractions. Cet appareil est exposé au milieu de la cour de l'Observatoire; il est porté sur une petite charpente en chêne, formant une espèce d'urnoire, dans laquelle sont enfoncés le réservoir, la cuvette et les vases gradués.

Un appareil semblable est disposé au-dessus de la terrasse de l'Observatoire; son récipient est à 28 mètres au-dessus du récipient de la cour; il est comme celui-ci parfaitement libre et découvert.

Voici le résultat des observations qui ont été faites depuis 1817, au moyen de ces deux instrumens.

Tableau des quantités de pluie qui ont été recueillies à l'Observatoire de Paris depuis 1817.

Années.	Dans la cour.	Sur la terrasse.
1817	57 centimètres.	61 centimètres.
1818	52	43
1819	69	62
1820	43	38
1821	66	58
1822	48	42
1823	52	46
1824	65	57
1825	52	47
1826	47	41
1827	58	50
1828	63	59
1829	59	56
Moyenne. . .	56	50

Ainsi, pour ces treize années, la quantité moyenne de pluie qui tombe annuellement à Paris dans la cour de l'Observatoire est de 56 centimètres, tandis que la quantité moyenne qui tombe sur la terrasse est seulement de 50 centimètres.

Cette différence n'est pas l'effet du hasard, puisqu'elle a lieu chaque année dans le même sens et presque avec la même valeur. Il en résulte ce fait très remarquable, qu'à Paris, la quantité de pluie qui tombe à 28 mètres de hauteur n'est que les 8/9 à peu près de celle qui tombe sur le sol.

On présume que ce phénomène dépend en grande partie de la condensation que les gouttes de pluie froide déterminent dans la vapeur en traversant les couches inférieures de l'atmosphère, et peut-être aussi des brouillards, qui sont toujours plus denses à la surface du sol, et qui déposent une quantité d'eau notable.

Tableau des quantités moyennes de pluie qui ont été recueillies en différents points du globe.

Cap-François (Saint-Domingue).	308	centimètres.
La Grenade (Antilles).	284	
Tivoli (Saint-Domingue).	273	
Carthagana.	240	
Bombay.	208	
Calcutta.	205	
Kendal.	156	
Gènes.	140	
Charlestown.	130	
Joyeuse.	129	
Pise.	124	
Milan.	96	
Naples.	95	
Douvres.	95	
Viviers.	92	
Lyon.	89	
Liverpool.	86	
Manchester.	84	
Venise.	81	
Lille.	78	
Utrecht.	73	
La Rochelle.	68	
Paris.	56	
Marseille.	47	
Pétersbourg.	40	

Les observateurs ne doivent pas seulement s'appliquer à déterminer les quantités moyennes de pluies, mais encore à constater les moyennes mensuelles parce qu'elles ont une influence plus directe sur les récoltes.

Les pluies très abondantes ne méritent pas moins d'attention : c'est dans les circonstances qui les accompagnent que l'on peut chercher les véritables causes de la formation de la pluie, et peut-être aussi les principes de la constitution des nuages.

Nous citerons ici quelques faits remarquables sur ce sujet :

A Bombay, il est tombé en un seul jour (le 24 juillet 1819) 6 pouces d'eau ou 16 centimètres. C'est presque le tiers de ce qui tombe à Paris dans le cours d'une année.

A Cayenne, le contre-amiral Roussin a vu tomber le 14 février, en dix heures de temps, plus de 10 pouces d'eau, ou 25 centimètres ; c'est précisément la moitié de ce qui tombe à Paris pendant toute l'année.

A Gènes, par une averse qui était, à ce qu'il paraît, occasionnée par une trombe, il est tombé, le 25 octobre 1822, jusqu'à 30 pouces d'eau ou 82 centimètres. C'est l'un des résultats les plus étonnans que l'on puisse citer en ce genre.

668. On ne sait que très peu de chose sur la formation de la neige ; on ne sait pas si les nuages qui la produisent sont composés de vapeurs vésiculaires ou de parcelles déjà glacées ; on ne sait pas si les

flocons se forment directement, ou s'ils prennent leur accroissement en traversant les couches inférieures de l'air ; on n'a pas observé leur température, ni les circonstances qui déterminent leur forme et leur volume.

Les seules observations un peu complètes que l'on possède sur la neige, sont relatives aux diverses formes que peuvent affecter les flocons. Le capitaine Scoresby a en l'occasion de faire, dans les régions polaires, une foule de recherches intéressantes sur ce sujet ; son ouvrage contient une centaine de figures diverses, parmi lesquelles nous avons choisi celles qui paraissent les plus remarquables, elles sont représentées dans la planche 32, figures 811 à 826.

Kepler et beaucoup d'autres physiciens avaient déjà recueilli des observations analogues.

Le *grésil*, que nous avons occasion d'observer dans nos climats, presque toutes les années, dans les mois de mars et d'avril, a sans doute une origine analogue à celle de la neige. C'est aussi de l'eau congelée, ou plutôt de petites aiguilles de glace pressées et entrelacées, formant une espèce de neige assez compacte, et quelquefois enveloppée d'une couche de véritable glace transparente. On ne sait rien jusqu'à présent sur les causes qui déterminent ce phénomène.

Le verglas est une couche de glace unie, mince et transparente, qui couvre la terre et quelquefois les plantes, les arbres et tous les objets répandus sur le sol. Sa cause est connue ; la condition nécessaire à sa production est que l'air soit assez chaud pour donner naissance à de la pluie, et que le sol soit assez froid pour congeler cette pluie à mesure qu'elle tombe. Ainsi le verglas n'est que de la pluie qui se congèle en touchant le sol.

Neige rouge.

669. *Neige rouge des Alpes, des régions polaires et de la Nouvelle-Shetland du Sud.* — Les anciens avaient remarqué que la neige prend quelquefois une teinte rouge, on en trouve dans les œuvres de Pline (liv. ix, chap. xxxv) un passage dans lequel il est dit que la neige devient rouge en vieillissant : *Ipsa nix vetustate rubescit*. Le fait est à la fois énoncé et expliqué ; c'était l'usage des anciens, et, par un hasard assez extraordinaire, il se trouve quelque chose de juste dans cette singulière explication.

Plusieurs observateurs modernes se sont occupés de ce curieux phénomène. M. Sanssouave avait vu de la neige rouge en 1760, sur le Brévern, et en 1779 sur le Saint-Bernard (*Voyage dans les Alpes*). Après en avoir décrit le gisement et toutes les apparences, il suppose que cette coloration de la neige est produite par des poussières végétales. Ramond a trouvé pareillement de la neige rouge dans les Pyrénées. Le capitaine Ross en a trouvé sur les côtes de la baie Baffin ; les capitaines Parry,

Franklin et Scoresby ont pu en recueillir à des latitudes boréales beaucoup plus élevées, et enfin des navigateurs en ont trouvé abondamment dans la Nouvelle-Schétland du Sud, à 70° de latitude australe.

Les généreux solitaires de l'hospice du Saint-Bernard, qui se livrent avec un zèle si louable aux observations météorologiques aussi bien qu'aux devoirs pénibles de la charité, ont aussi l'occasion de voir habituellement des neiges rouges et d'en recueillir pour les soumettre à l'expérience. C'est par leurs soins que M. de Candolle a pu faire, à Genève, une comparaison directe entre la substance colorante des neiges polaires et des neiges du Saint-Bernard.

Dans les Alpes, la neige rouge se trouve répandue çà et là, et particulièrement dans les lieux bas ou dans les petits enfoncements abrités; elle ne pénètre pas à plus de deux ou trois pouces de profondeur, ou pour mieux dire, les zones quelquefois profondément ensevelies dans lesquelles on la trouve, n'ont en général que 2 ou 3 pouces d'épaisseur.

Sur les côtes de la baie de Baffin, le capitaine Ross a recueilli de la neige rouge sur une vaste colline de 2 ou 3 lieues d'étendue; le sommet de cette colline était dépouillé de neige et pouvait avoir environ 200 mètres de hauteur. Quelques-uns des savans de l'expédition paraissent supposer que la neige rouge se trouvait à 10 ou 12 pieds de profondeur au-dessous de la surface; d'autres disent qu'elle n'avait que quelques pouces d'épaisseur. Cette étrange discordance laisse quelque incertitude sur un point qui n'est pas cependant sans intérêt.

Pour analyser ces neiges extraordinaires, on les recueille dans des flacons, et l'on conserve l'eau de fusion à l'abri du contact de l'air, la substance qui la colore n'éprouve pas d'altération sensible avec le temps, car l'eau, qui est limpide lorsqu'elle est bien reposée, devient rouge comme la neige toutes les fois qu'on l'agite pour y mêler le dépôt. C'est au moyen de cette propriété qu'il a été permis de comparer directement les neiges rouges des différentes contrées.

MM. Wollaston, R. Brown, de Candolle, Thénard, Peschier et Francis Baüer ont soumis à diverses épreuves cette substance colorante pour en déterminer la nature. Wollaston a reconnu le premier qu'elle est composée de petits globules sphériques, dont les diamètres assez variables sont compris entre 1 et 2 centièmes de millimètres; ces globules ont une enveloppe transparente et se trouvent divisés à l'intérieur en 7 ou 8 cellules remplies d'une espèce d'huile rouge insoluble dans l'eau. MM. R. Brown et de Candolle, après avoir vérifié l'existence de ces globules, ont supposé qu'ils étaient de petites plantes appartenant à la famille des algues. MM. Thénard et Peschier ont aussi reconnu, par l'analyse chimique, que le dé-

pôt des eaux de neige rouge est de nature végétale.

Enfin, M. Francis Baüer a publié sur ce sujet plusieurs mémoires qui semblent résoudre la question d'une manière complète. Ses premières observations sont aussi anciennes que celles de Wollaston, dont il n'avait pas eu connaissance. M. Baüer a reconnu aussi l'existence des globules sphériques et leur séparation en plusieurs compartimens; il a démontré qu'ils sont tout-à-fait les mêmes dans les neiges de la Nouvelle-Schétland et dans celles de la baie de Baffin; et il a constaté que ces globules sont de *petits champignons* du genre *uredo*, formant une espèce particulière qu'il appelle *uredo nivalis*, parce que leur *sol naturel* est la neige. M. Baüer a été conduit à cette dernière conséquence par une expérience ingénieuse: ayant exposé à l'air de la matière colorante des neiges, suspendue dans l'eau de fusion, il s'aperçut d'abord que les globules microscopiques se multipliaient visiblement; mais les individus nouveau-nés restaient transparents; il y avait donc dans l'eau une végétation; mais une végétation incomplète, qui n'arrivait pas à maturité. En substituant de la neige à l'eau, pendant les mois d'hiver, on vit cette végétation se développer avec plus de succès: car le nombre des globules rouges fut à peu près doublé en assez peu de temps, malgré de fréquentes interruptions de froid et de neige.

Ces résultats semblaient décisifs, et ils sont à la fois si curieux et si faciles à vérifier, que les observateurs qui sont en position de le faire n'en laissent pas sans doute échapper l'occasion.

670. *Neiges des glaces flottantes.* — Les navigateurs qui ont visité les régions polaires ont observé souvent des neiges rouges sur les glaces flottantes. On aurait pu présumer que cette coloration avait la même origine que celle des neiges continentales; mais le capitaine Scoresby ayant observé au microscope quelques sédiments de ces neiges flottantes, croit avoir remarqué des mouvements sensibles et même assez rapides dans les petits corpuscules qui forment la matière colorante. Il y aurait ainsi deux espèces de neige rouge et deux espèces de corps organisés capables de prospérer dans ce sol ingrat, qui semble si peu fait pour la vie organique. Cependant, malgré toute la confiance que doit inspirer le nom de M. Scoresby, ses animalcules, tels qu'il les a décrits, ont de si grandes analogies avec les globules de l'*uredo nivalis*, qu'il me semblerait nécessaire de vérifier ces résultats avant de les adopter comme décisifs.

Chutes de poussières et de substances molles, sèches ou humides.

671. Nous rapporterons sous ce titre toutes les indications qui ont été recueillies sur les pluies extraordinaires appelées *pluies de sang*, *pluies de cendres*, *pluies de manne*, etc., et sur les diverses

substances météoriques, molles ou pulvérescentes, qui tombent de l'atmosphère.

Pour donner une idée des circonstances qui accompagnent quelquefois ces météores, nous choisirons comme exemple la pluie rouge qui est tombée le 14 mars 1813 dans le royaume de Naples et dans les deux Calabres. M. Sementini a rendu compte de ce phénomène de la manière suivante.

« Le 14 de mars 1813, par un vent d'est qui soufflait depuis deux jours, les habitants de Gérace aperçurent une nuée dense s'avancer de la mer sur le continent. A deux heures après midi, le vent se calma, mais la nuée couvrait déjà les montagnes voisines et commençait à intercepter la lumière du soleil; sa couleur, d'abord d'un rouge pâle, devint ensuite d'un rouge de feu. La ville fut alors plongée dans des ténèbres si épaisses que vers les quatre heures on fut obligé d'allumer des chandelles dans l'intérieur des maisons. Le peuple, effrayé et par l'obscurité et par la couleur de la nuée, courut en foule dans la cathédrale faire des prières publiques. L'obscurité alla toujours en augmentant, et tout le ciel parut de la couleur du fer rouge: le tonnerre commença à gronder, et la mer, quoique éloignée de six milles de la ville, augmentait l'épouvante par ses mugissements. Alors commencèrent à tomber de grosses gouttes de pluie rougeâtre que quelques-uns regardaient comme des gouttes de sang, et d'autres comme des gouttes de feu. Enfin, aux approches de la nuit, l'air commença à s'éclaircir, la foudre et le tonnerre cessèrent, et le peuple retourna dans sa tranquillité ordinaire.

« Sans commettre populisme et avec quelques différences en plus ou en moins, le même phénomène d'une pluie de poussière rouge eut lieu non-seulement dans les deux Calabres, mais encore dans l'extrémité opposée des Abruzzes.

« Cette poussière a une couleur d'un jaune de cannelle et une saveur terreuse peu marquée; elle est onctueuse au toucher, tant est grande sa ténuité, quoiqu'on y découvre à la loupe de petits corps durs ressemblant au pyroxène, mais qui sont étrangers à la poussière, et qui s'y sont accidentellement mêlés lorsqu'en l'a recueillie sur le terrain. La chaleur la brunit, puis la rend tout-à-fait noire, et enfin la rougit si elle devient plus intense. Après l'action de la chaleur, elle laisse apercevoir, même à l'œil nu, une multitude de petites lames brillantes qui sont du mica jaune: elle ne fait plus alors effervescence avec les acides, et a perdu environ au dixième de son poids. Sa pesanteur spécifique, lorsqu'elle s'est privée de corps durs, est de 2,07; elle est composée de :

Silice.	33,0
Alumine.	16,6
Chaux.	11,6
Carbone.	1,0
Fer.	14,5
Acide carbonique.	0,0

84,6

« La perte est due à une substance résineuse de couleur jaunâtre, que l'on obtient en traitant la poudre par l'alcool et en faisant évaporer à siccité: le poids du résidu correspondait à très peu près à la perte éprouvée dans l'analyse. Cette matière résineuse donne à la poudre la propriété de déflagrer avec le nitre. (*Giorn. di Fisica*, etc., *decade seconda*. I. 28.) »

M. Chladni a dressé un tableau complet de tous les météores de cette espèce qui ont été observés en divers lieux; nous le rapporterons ici tel qu'il a été publié dans l'*Annuaire du bureau des longitudes* pour 1826.

« L'an 478 de notre ère (suivant la chronologie de Calvisius, Playfair, etc.), le 5 ou 6 novembre. Grande chute de poussière noire (probablement aux environs de Constantinople); le ciel semblait brûler. *Procopé* et *Marcellin* l'ont attribué au Vésuve. *Menana*, *Molog. Græc.*, *Zonaras*, *Cedrenus*, *Theophanes*.

652. A Constantinople. Pluie de poussière rouge. *Theophanes*, *Cedrenus*, *Mathieu Erithr.*

743. Un météore et poussière dans différents endroits. *Theophanes*.

.... Au milieu du neuvième siècle. Poussière rouge et matière semblable au sang coagulé. *Continuat. du Georg. Monachus*, *Kazuvini*, *El-Masari*.

809. Pluie rouge pendant trois jours, aux environs de Brixen. *Hadrianus Borlandus*. (Peut-être ce phénomène est-il le même que le précédent.)

929. A Bagdad, rougeur du ciel, et chute de sable rouge. *Quatremère*.

1056. En Arménie, neige rouge. *Matth. Eriza*.

1110. En Arménie, dans la province de Vaspouragan, en hiver, durant une nuit obscure, chute d'un corps enflammé dans le lac de Van. L'eau devint couleur de sang, et la terre était couverte dans différents endroits. *Matth. Eriza*. (*Notices et extraits de la Bibl.*, t. IX.)

1222 ou 1219. Pluie rouge aux environs de Viterbo. *Biblioth. Italiano*, t. XIX.

1416. Pluie rouge en Bohême. *Spangenberg*.

?.... Dans le même siècle, à Lucerne, chute d'une pierre et d'une masse semblable à du sang coagulé, avec apparition d'un dragon igné (ou météore de feu). *Cysat*.

1501. Pluie de sang dans différents endroits, suivant quelques chroniques.

1543. Pluie rouge en Westphalie. *Sumi Commentarii*.

1548, 6 novembre (probablement en Thuringe). Chute d'un globe de feu, avec beaucoup de bruit: en tronva ensuite sur le sol une substance rougeâtre, semblable au sang coagulé. *Spangenberg*.

1557. En Poméranie. Grandes plaques d'une substance semblable au sang coagulé. *Mart. Zeiler*, t. II, epist. 386.

1590. Jour de la Pentecôte, pluie rouge à Emden et à Lonsain, etc. *Fronsd.*

1560, 24 décembre. A Lillebonne, météore de feu et pluie rouge. *Natalia Comes*.

? 1582, 5 juillet. A Reckhausen, non loin d'Erfort, chute d'une grande quantité d'une substance fibreuse, semblable à des erins humains, à la suite d'une tempête horrible, analogue à celles qu'amènent les tremblements de terre. *Michel Bapat*.

1590, 3 décembre. A Verde (en Hanovre), chute de beaucoup de matière rouge et noirâtre, avec éclairs et tonnerre (météore de feu et détonation). Cette matière brûlait les planches sur lesquelles elle tombait. *Manuscrit de Salomon, sénateur à Brème*.

1591. A Orléans, à la Madeleine, pluie de sang. *Lemaire (L.)*.

1618, en août. Chute de pierres, météore de feu et pluie de sang, en Sicile. *De Hammer*.

1623, 12 août, à Strasbourg. Pluie rouge. *Élias Habrecht*, dans un mémoire imprimé à Strasbourg, en 1623.

1637, 6 décembre. Chute de beaucoup de poussière noire dans le golfe de Volo et en Syrie. *Phil. Transact.*, t. I, pag. 377.

1638. Pluie rouge à Tournay.

1643, en janvier. Pluie de sang à Vachingen et à Weinsberg, suivant une *chronique manuscrite de la ville de Heilbronn*.

1645, 23 ou 24 janvier. A Bois-le-Duc.

1640, 5 octobre. Pluie rouge à Bruxelles. *Kronland et Wendelinaus*.

1652, en mai. Masse visqueuse, à la suite d'un météore lumineux, entre Sienne et Rome. *Miscell. Acad. nat. curios.*, ann. 9, 1690.

? 1665, 23 mars, près Laucha, non loin de Naumburg, il tomba une substance fibreuse, comme de la soie bleue, en grande quantité. *Joh. Prætorius*.

1678, 19 mars. Neige rouge, près de Gènes. *Philos. Trans.*, 1678.

1686, 31 janvier, près de Rauden, en Courlande, et en même temps en Norwège et en Poméranie. Une grande quantité d'une substance membraneuse, friable et noirâtre, semblable à du papier demi-brûlé. *Miscell. Acad. nat. cur.*, ann. 7, *pro ann.* 1688, in *Append.* (M. le baron Théodore de Grothius a analysé une portion de cette substance, qui avait été conservée dans un cabinet d'histoire naturelle, et y a trouvé de la silice, du fer, de la chaux, du carbone, de la magnésie, une trace de chrome et de soufre, mais point de nickel.)

1689. Poussière rouge à Venise, etc. *Valentieri*.

1711, 5 et 6 mai. Pluie à Orsien, en Suède. *Act. Lit. Suecica*, 1731.

1718, 24 mars. Chute d'un globe de feu dans l'île de Lethy, aux Indes. On a trouvé ensuite une matière gélatineuse. *Barchewitz*.

1719. Chute de sable dans la mer Atlantique (lat. sept. 45°, longit. 322° 43'), accompagnée d'un météore lumineux. *Mém. de l'Acad. des Sciences*, 1719, Hist., p. 23. (Il aurait fallu examiner ce sable avec plus d'attention.)

1721, vers le milieu de mars, Stuttgart. Météore et pluie rouge en grande quantité, d'après une notice écrite le 21 mars par un conseiller. *Fischer*.

1737, 21 mai. Chute de terre attirable à l'aimant, sur la mer Adriatique, entre Monopoli et Lissia. *Zanichelli*, dans les *Opusculi di Calogera*, t. XVI.

1744. Pluie rouge à Saint-Pierre-d'Arena, près de Gènes. *Richard*.

1755, 20 octobre, sur l'île de Getland, l'une des Orcades. Poussière noire qui n'était pas venue de l'île. *Philosoph. Transact.*, vol. L.

1755, 13 novembre. Rougeur du ciel et pluie rouge dans différents pays. *Nov. act. nat. cur.*, t. II.

1763, 9 octobre. Pluie rouge à Clèves, à Utrecht, etc. *Mercurio historico y politico de Madrid*, octobre 1764.

1765, 14 novembre. Pluie rouge en Picardie. *Richard*.

1781, en Sicile. Poussière blanche qui n'était pas volcanique. *Giomi, Phil. Trans.*, t. LXXII.

1792, 27, 28 et 29 août sans interruption. Pluie d'une substance semblable à de la cendre dans la ville de la Paz, au Pérou. Ce phénomène ne pouvait pas être attribué à un volcan. On avait entendu des explosions, et vu le ciel tout éclairé. La poussière occasiona de grands maux de tête, et donna la fièvre à plusieurs personnes. *Mercurio Peruano*, t. VI, 1792.

1796, 8 mars. On a trouvé en Lusace, après la chute d'un globe de feu, une matière visqueuse. *Ann. de Gilbert*, t. LV.

1803, 5 et 6 mars, en Italie. Chute de poussière rouge; sèche dans quelques lieux et humide dans d'autres. *Opusculi scelti*, t. XXII.

1811, en juillet, près de Heidelberg. Chute d'une substance gélatineuse à la suite de l'explosion d'un météore lumineux. *Ann. de Gilbert*, t. LXVI.

1813, 13 et 14 mars, en Calabre, Toscane et Frioul. Grande chute de poussière rouge et de neige rouge, avec beaucoup de bruit. Il tomba en même temps des pierres à Caltro, en Calabre. *Bibl. Brit.*, octobre 1813 et avril 1814.

(Sementini a trouvé dans la poussière : silice 33; alumine, 15 1/3; chaux, 11 1/4; fer, 14 1/2; chrome, 1; carbone, 9. La perte était 15. Il paraît que Sementini n'a pas cherché la magnésie et le nickel.)

1814, 3 et 4 juillet. Grande chute de poussière noire au Canada, avec apparition de feu. L'événement était semblable à celui de 473. *Philos. Mag.*, vol. XLIV.

1814. La nuit du 27 au 28 octobre, dans la vallée d'Onégia, près de Gènes, pluie rouge. *Giornale di Fisica*, T. I, p. 32.

1814, 5 novembre. On a trouvé dans le Doab, aux Indes, que chaque pierre touchée était dans un petit amas de poussière. *Phil. Mag.*

1815, vers la fin de septembre. La mer, au sud des Indes, était couverte de poussière sur une très grande étendue, probablement à la suite d'une pareille chute. *Phil. Mag.*, juillet 1816.

1816, 15 avril. Neige rouge dans différents endroits de la partie septentrionale de l'Italie. *Giornale di Fisica*, etc., T. 1, 1818, p. 473.

1819, 13 août, à Amherst, en Massachusetts. A la suite d'un météore lumineux, il tomba une masse gélatineuse et puante. *Silliman Journal*, II, 335.

1819, 5 septembre, à Studein en Moravie, dans la juridiction de Teltsch, entre onze heures et midi, le ciel étant serein et tranquille, plein de petits morceaux de terre provenant d'un petit nuage isolé et très clair. *Herperus*, novembre 1819, et *Ann. de Géb.*, T. LXVIII.

1819, 6 novembre. Pluie rouge en Flandre et en Hollande. *Ann. générales des sciences physiques*. (On a trouvé dans cette pluie du cobalt et de l'acide muriatique).

1819, en novembre, à Montréal et dans la partie septentrionale des États-Unis. Pluie et neige noires, accompagnées d'un obscurcissement du ciel extraordinaire, de secousses comme durant un tremblement de terre, de détonations semblables à des explosions d'artillerie, et d'apparitions ignées, qu'on a prises pour des éclairs très forts. *Ann. de Chimie*, T. XV. Quelques personnes ont attribué le phénomène à l'incendie d'une forêt; mais le bruit, les secousses, etc., montrent que c'était un véritable météore, comme ceux de 472, de 1637, de 1762 et de 1814 (au Canada). Il paraît que les pierres noires et friables tombées à Alais, en 1806, étaient à peu près la même substance dans un état de coagulation plus avancé.

1821, 3 mai, à neuf heures du matin. Pluie rouge dans les environs de Giessen. M. le professeur *Zimmermann* ayant analysé le sédiment brun rougeâtre que cette pluie laissait, y a trouvé du chrome, de l'oxide de fer, de la silice, de la chaux, du carbone, une trace de magnésie et des parties volatiles, mais point de nickel.

1824, 13 août. Ville de Mendoza, dans la république de Buénos-Ayres. Poussière qui tombait d'un nuage noir. A une distance de 40 lieues, le même nuage se déchargea encore une fois. *Gazette de Buénos-Ayres*, du 1^{er} novembre 1824.

M. Chladni paraît supposer que la plupart des météores contenus dans le tableau précédent ont la même origine que les aérolithes; mais d'autres physiciens présumant que la puissance du vent est bien suffisante pour balayer à la surface de la terre de grands amas de substances diverses, et pour les emporter à de grandes hauteurs dans l'atmosphère. Nous citerons encore un fait assez récent qui vient à l'appui de cette dernière opinion.

En Perse, dans la province de Romod, non loin du mont Ararath, il est tombé, au mois d'avril 1827, une pluie de graines qui a, dans quelques endroits, couvert la terre d'une couche de six pou-

ces d'épaisseur. Les moutons en ont mangé, et ensuite les hommes en ont pris et en ont fait un pain très passable. M. le comte de Soklen ayant reçu des échantillons de cette graine, et M. de La Ferrounays, notre ambassadeur en Russie, en ayant envoyé à Paris, MM. Desfontaines et Thénard ont pu l'observer et la soumettre à diverses expériences. M. Desfontaines l'a immédiatement reconnue pour un lichen appartenant probablement au genre *Lecidea*, et l'analyse chimique a aussi constaté son identité avec les lichens.

Aérolithes.

672. Les *aérolithes* ou *météorites* sont des pierres qui tombent du ciel. Leur origine est encore un mystère. Les uns prétendent que les aérolithes sont lancés par les volcans de la lune jusque dans la sphère d'attraction de la terre; d'autres imaginent qu'ils existent tout formés dans les espaces célestes, qu'ils se meuvent avec une grande vitesse en vertu des actions planétaires, et qu'ils tombent sur notre globe quand son action sur eux devient prédominante; enfin, il y en a qui regardent les aérolithes comme des fragmens de roche que nos volcans ont lancés à une grande hauteur, et qui retombent ensuite après avoir décrit plusieurs révolutions autour de la terre. Si l'origine des aérolithes reste enveloppée de tant d'incertitudes, il est vrai de dire au moins que leur existence est parfaitement constatée en Europe depuis le commencement de notre siècle. Nous emprunterons encore à M. Chladni le catalogue chronologique des aérolithes qui sont tombés en différents lieux; mais nous supprimerons toutes les observations plus ou moins incertaines qui précèdent l'année 1800.

« 1801. Sur l'île des Tonnelliers. *Bory de Saint-Vincent*.

1802, en septembre. Pierres en Écosse. *Monthly Magazine*, octobre 1802.

1803, 26 avril. Pierres aux environs de L'Aigle.

1803, 4 juillet. A East-Norton. *Phil. Mag.* et *Bibl. Brit.*

1803, 8 octobre. Une pierre près d'Apt.

1803, 13 décembre. Près Eggenfelde. *Imhof*.

1804, 5 avril. Près Glasgow. *Ph. Mag.* et *Bibl. Brit.*

De 1804 à 1807. A Dordrecht. *Van Beck-Calkorn*.

1805, 25 mars. Pierres à Dorouinsk, en Sibirie. *Annales de Gilbert*, T. XXIX et XXXI.

1805, en juin. Pierres à Constantinople. *Kewas-Ingislan*.

1806, 13 mars. A Alais.

1806, 17 mai. Pierre en Hantsire. *Monthly Mag.*

1807, 13 mars. Près Timochin, en Russie. *Annales de Gilbert*.

1807, 14 décembre. Pierres près de Weston, en Connecticut.

1808, 19 avril. A Borgo San-Dovino, *Guidotti et Sagnoni*.

- 1808, 22 mai. Près Stannero, en Moravie.
- 1808, 3 septembre. A Lissa, en Bohême. *De Schreibern.*
- 1809, 17 juin. En mer, près de l'Amérique septentrionale. *Medical. Reposit. et Bibl. Brit.*
- 1810, 30 janvier. Dans Caswel, en Amérique. *Phil. Mag. et Medical. Reposit.*
- 1810, en juillet. Une grande pierre à Shahad, dans l'Inde. Le météore a causé de grands dégâts. *Phil. Mag.*, T. XXXVII.
- 1810, en août. Une pierre dans le comté de Tipperary, en Irlande. William Higgins en a publié l'analyse.
- 1810, 23 novembre. Pierres à Charsonville, près d'Orléans.
- 1811, 12-13 mars. Une pierre dans la province de Peltawa, en Russie. *Annales de Gilbert*, T. XXXVIII.
- 1811, 8 juillet. Pierres à Berlangnillas.
- 1812, 10 avril. Près Toulouse.
- 1812, 15 avril. Une pierre à Ersleben. *Annales de Gilbert*, T. XL et XLI.
- 1812, 5 août. A Chantonay. *Brochant.*
- 1813, 14 mars. Pierres à Cutro, en Calabre, pendant la chute d'une grande quantité de poussière rouge. *Bibl. Britan.*, octobre 1813.
- 1813, en été. Beaucoup de pierres près Malpas, non loin de Chester. *Thomson, Anna. of Philosophy*, novembre 1813. (La relation ne me paraît pas digne d'une entière confiance, parce qu'elle est anonyme, et surtout parce qu'il n'y a pas eu d'autres notices de cet événement.)
- 1813, 10 septembre. Pierres près Limerick, en Irlande. *Phil. Mag. et Gentlem. Mag.*
- 1813, 13 décembre, d'après Nordenskiöld (*Annales de chimie*, T. XXV, p. 78), na :
- 1814, en mars, d'après un rapport communiqué à l'Académie de Pétersbourg. Pierres aux environs de Loutalax et Sawitaipai, non loin de Wiborg, en Finlande. Ces pierres ne contiennent pas de nickel.
- (M. Murray fait mention dans le *Phil. Mag.*, juillet 1819, page 39, d'une pierre tombée à Pulrose, dans l'île de Man, sans préciser la date; il dit que l'événement est certain, et que la pierre était très légère et semblable à une scorie. Elle devrait donc ressembler aux pierres tombées en Espagne en 1438.)
- 1814, 3 février. Pierre près Bacharat, en Russie. *Ann. de Gilbert*, T. L.
- 1814, 5 septembre. Pierre près d'Agen.
- 1814, 5 novembre. Dans Doub, aux Indes. *Phil. Mag., Bibl. Brit., Journal of sciences.*
- 1815, 18 février. Une pierre à Duralla, aux Indes. *Philos. Magazine*, août 1820, p. 156.
- 1815, 3 octobre. A Chassigny, près de Langres. *Pistolel, Ann. de chimie.*
1816. Pierre à Glastonbury, en Somersetshire. *Phil. Mag.*
- 1817, entre le 2 et le 3 mai. Probablement des masses sont tombées dans la mer Baltique. Après

l'apparition d'un grand météore à Gøthenbourg, on a vu, à Odensée, une pluie de feu descendre très rapidement vers le S.-E. *Journaux danois.*

1818, 15 février. Une grande pierre paraît être tombée à Limoges, dans un jardin au sud de la ville. Après l'explosion d'un grand météore, une masse qui tomba fit dans la terre une excavation d'un volume égal à celui d'une grande futaie. *Gazette de France et Journal du Commerce*, du 25 février 1818.

(Il aurait fallu, et il serait encore convenable, de déterrer la masse.)

1818, 30 mars. Une pierre près de Zaborzyco, en Volhynie (analysée par M. Laugier. *Ann. du Muséum*, 17^e année, 2^e cahier.)

1818, 10 août. Une pierre est à Slobotka, dans la province de Smolensk, en Russie. *D'après plusieurs journaux.*

1819, 14 juin. A Jonzac, département de la Charente-Inférieure. Ces pierres ne contiennent pas de nickel.

1819, 13 octobre. Pierres près de Politz, non loin de Géra ou Kostritz, dans la principauté de Reuss. *Ann. de Gilbert*, T. LXIII.

1820, entre le 21 et le 22 mars, dans la nuit, à Vedenburg, en Hongrie. *Hesperus*, T. XXVII, cah. 3.

1820, 12 juillet. Pierres près de Likna, dans le cercle de Dunaborg, province de Wittepsk, en Russie. *Thodore Grotthus. Ann. de Gilbert*, T. LXVII.

1821, 15 juin. Pierres près de Juvenas. Elles ne contiennent pas de nickel.

1822, 3 juin. A Angers. *Ann. de chimie.*

1822, 10 septembre. Près Carlstadt, en Suède.

1822, 13 septembre. Près la Raffe, canton d'Épinal, département des Vosges. *Ann. de chimie.*

1823, 7 août. Près Noldchoro, en Amérique. *Silliman's American Journ.*, T. VII.

1824, vers la fin de janvier. Beaucoup de pierres près Arenazzo, dans le territoire de Bologne. Une d'elles, pesant 12 livres, est conservée dans l'Observatoire de Bologne. *Diario di Roma.*

1824, au commencement de février. Grande pierre dans la province d'Irkutsk, en Sibérie. *Quelques journaux.*

1824, 14 octobre. Près Zélbrak, cercle de Béraun, en Bohême. La pierre est conservée au Muséum national de Prague.

Nous aurions pu augmenter ce catalogue en y ajoutant plusieurs chutes d'aérolithes qui ont été observées depuis 1824; mais dans la crainte de présenter un travail incomplet, nous aimons mieux attendre que les savans et laborieux auteurs qui s'occupent de ce sujet réunissent tous les documens qui ont été recueillis depuis cette époque.

Les habitans de la Chine, du Japon et des provinces voisines, ont donné une attention particulière au phénomène des aérolithes; ils ont aussi leur catalogue raisonné de toutes les chutes de pierre; et ce catalogue est bien plus complet que

le nôtre, car il remonte au 7^{me} siècle avant Jésus-Christ. M. Abel-Rémusat a publié en 1819 (*Journal de physique*) un mémoire très intéressant sur ce sujet. Les observations chinoises sont trop remarquables pour que nous n'essayions pas d'en donner une idée en citant quelques exemples.

Quelques observations chinoises sur la chute des aërolithes.

644 ans avant Jésus-Christ, au printemps, à la première lune, le jour ou-chin à la nouvelle lune, cinq pierres tombèrent dans le royaume du Saung (Ho-nou).

811 ans avant Jésus-Christ, la planète Mars étant dans le voisinage d'Autarès, une étoile tomba à Toug-kion, et parvenue à terre, elle se changea en pierre. On grava sur cette pierre six caractères qui signifiaient : *L'empereur va mourir et son empire sera divisé*. L'empereur envoya sur les lieux des officiers pour arrêter et châtier les auteurs de cette supercherie, et fit brûler la pierre.

32 ans avant Jésus-Christ, à la neuvième lune, le jour ou-tseu, un globe de feu sortit de la grande ourse; sa couleur était blanche et sa lumière éclairait la terre. Elle était de forme allongée de 40 pieds de long, et s'agitait comme un serpent. Elle grandit jusqu'à la longueur de 50 ou 60 pieds, et forma des ondulations à l'ouest du cercle de perpétuelle opposition, au nord-ouest du zodiaque; elle se roula ensuite comme un anneau qui ne se joignait pas du côté du nord.

2^{me} année de l'ère chrétienne. A la sixième lune, il tomba deux pierres à Kiu-lou. Depuis le temps de Hoel-té, on compte onze chutes de pierres, qui toutes furent accompagnées de lumière et d'un bruit comme celui du tonnerre.

310. A la 10^e lune, le jour keng-tseu, une étoile de feu tomba avec bruit dans la partie du nord-ouest; on la fit chercher, et l'empereur en reçut des fragments à Ping-yang.

333. Une étoile tomba à 6 lieues au nord-est de Ye; elle était d'abord d'un rouge noirâtre. Un nuage jaune s'étendait comme un rideau à plusieurs centaines de pieds. On entendit un bruit comme celui du tonnerre. Quand elle tomba à terre elle était brûlante; la poussière se leva jusqu'au ciel. Des laboureurs qui la virent tomber allèrent la chercher; la terre était encore très chaude. Ils virent une pierre large d'un pied au moins, de couleur noirâtre et assez légère, qui résonnait, quand on la frappait, comme l'instrument appelé king.

1057. A Hoang-lié, en Corée, à la 1^{re} lune, il tomba une pierre avec un grand bruit de tonnerre. Cette pierre ayant été envoyée à la cour, le président de la cour des rites dit qu'il était tombé une pierre dès le temps de Tchin, et qu'on avait observé ce phénomène de temps en temps sous les dynasties de Tchin et de Thang; qu'ainsi ce n'était

pas là une chose extraordinaire et sans exemple, ni qui annonçât rien de fâcheux.

1510. A la 12^{me} lune, le vingt-cinquième jour, à Chou-king-fou, dans la province de Sse-tchouan, il n'y avait ni vent ni nuage. Tout à coup le tonnerre gronda, et il tomba six pierres; les plus pesantes étaient de 15 livres et même de 17 livres. Les plus petites pesaient une livre, ou même seulement 10 onces.

Pour compléter ces documents intéressants, nous ajouterons ici le nombre des chutes de pierres qui ont été observées en Chine dans chaque siècle, depuis le 7^{me} siècle avant Jésus-Christ, jusqu'au 16^{me} siècle de notre ère.

Dans la 7 ^{me} siècle avant Jésus-Christ.	2
3 ^{me}	1
2 ^{me}	1
1 ^{er}	11
1 ^{er} siècle après Jésus-Christ.	4
2 ^{me}	3
3 ^{me}	3
4 ^{me}	11
5 ^{me}	2
6 ^{me}	11
7 ^{me}	11
8 ^{me}	7
9 ^{me}	14
10 ^{me}	11
11 ^{me}	14
12 ^{me}	6
13 ^{me}	1
16 ^{me}	1

Masses de fer auxquelles on peut attribuer une origine météorique.

673. Nous rapporterons enfin, d'après M. Chladni, le tableau des masses de fer natif qui ont été trouvées à la surface de la terre, et qui sont regardées, par quelques savans, comme étant de véritables aërolithes tombées dans des temps très reculés.

« Les masses de fer, probablement météoriques, se distinguent par la présence du nickel, par leur tissu, par leur malléabilité et leur gisement isolé. Quelques-unes de ces masses sont spongieuses ou cellulaires; les cavités se trouvent remplies d'une substance pierreuse, semblable au péridote. Dans ce nombre il faut ranger :

La masse trouvée par Pallas, en Sibérie, dont les Tartares connaissaient l'origine météorique.

Un morceau trouvé entre Eibenstock et Johann-georgenstadt.

Une masse conservée dans le cabinet impérial de Vienne, provenant peut-être de la Norwège.

Une petite masse, pesant 4 livres, qui se trouve maintenant à Gotha.

D'autres masses sont solides. Le fer consiste alors en rhomboïdes ou en octaèdres, composés de couches ou feuilles parallèles.

La seule chute connue de masses de ce genre est celle qui eut lieu à Agram, en 1751.

Quelques autres masses semblables ont été trouvées :

Sur la rive droite du Sénégal. *Compagnon, Forster, Gohberry.*

Au cap de Bonne-Espérance. *Van Marum et de Dunkelmann.*

Au Mexique, dans différents endroits. *Sonnenchemidi de Humboldt.* Voy. aussi la *Gazeta de Mexico*, T. I et V.

Am Brésil, dans la province de Bahia. *Wollaston et Mornay.*

Dans la juridiction de Saint-Iago del Estero. *Rubin de Celis.*

A Elbogen, en Bohême. *Ann. de Gilbert*, T. XLII et XLIV.

Près de Lénart, en Hongrie. *Ann. de Gilbert*, T. XLIX.

Près de la rivière Rouge. La masse a été envoyée de la Nouvelle-Orléans à New-York. *American mineralogical Journal*, vol. I. Le colonel Gibbs l'a analysée et y a trouvé du nickel.

(Il y a encore d'autres masses semblables dans le même pays, d'après *The Minerva* de New-York, 1824.)

Aux environs de Bitbourg, non loin de Trèves. (Cette masse pèse 3300 livres; elle contient du nickel. L'analyse faite par le colonel Gibbs se trouve dans l'*American mineralogical Journal*, vol. I.)

Près de Bralin, en Pologne. (Ces masses, d'après les analyses de M. Langier, contiennent du nickel et un peu de cobalt.)

Dans la république de Colombie, sur la Cordillère orientale des Andes. *Boussingault et Mariano de Risco*, *Ann. de chimie*, T. XXV.

A quelque distance de la côte septentrionale de la baie de Baffin, dans un endroit nommé Sowallik. Il y a deux masses : l'une paraît être solide, l'autre est pierreuse et mêlée de morceaux de fer, dont les Esquimaux font des espèces de couteaux. *Copélandt et Rose.*

Peut-être faut-il ranger dans cette classe une grande masse d'environ 40 pieds de haut, qui se trouve dans la partie orientale de l'Asie, non loin de la source de la rivière Jaune, et dont les Mongols, qui l'appellent *Khadanulfilao*, c'est-à-dire Roche du Pôle, disent qu'elle tomba à la suite d'un météore de feu. *Abel Rémusat.*

— Il existe des masses d'une origine problématique. De ce nombre sont :

Une masse d'Aix-la-Chapelle, qui contient de l'arsenic. *Ann. de Gilbert*, T. XLVIII.

Une masse trouvée dans le Milanais. *Ann. de Gilbert*, T. L.

La masse trouvée à Groskamsdorf, contenant, d'après Klaproth, un peu de plomb et de cuivre.

(Il paraît qu'on l'a fondue, et que les morceaux conservés à Freyberg et à Dresde ne sont que de l'acier fondu qu'on a substitué aux fragments de la masse primitive.) »

CHAPITRE IV.

DE LA LUMIÈRE MÉTÉORIQUE.

674. Les phénomènes météorologiques qui appartiennent à la lumière sont trop nombreux et trop variés pour que nous puissions les développer en détail dans ces essais. Nous nous occuperons seulement

Du mirage,
De l'arc-en-ciel,
Des halos
Et des parhélies.

Mirage.

675. *Mirage observé en Égypte.* — Lorsqu'en regardant des objets éloignés, il arrive souvent, dans certaines circonstances, que ces objets donnent plusieurs images, droites, obliques ou renversées, et toujours plus ou moins altérées dans leurs contours. C'est l'apparence de ces images, sans réflexio-

teur visible pour les produire, qui constitue les phénomènes du mirage.

Nous donnerons d'abord la description de ces phénomènes tels qu'ils se présentent dans les plaines de l'Égypte.

Le sol de la Basse Égypte forme une vaste plaine, sur laquelle se répandent les eaux du Nil au temps de l'inondation. Sur les bords du fleuve, et jusqu'à une grande distance vers les déserts, soit à l'orient, soit à l'occident, on aperçoit de loin en loin de petites éminences sur lesquelles s'élèvent les édifices ou les villages. Dans les temps ordinaires, l'air est calme et très pur. Au lever du soleil, les objets éloignés se distinguent avec une netteté parfaite; l'observateur peut embrasser alors un vaste horizon, qui n'a rien de monotone, malgré son uniformité; mais quand la chaleur du jour se

fait sentir, quand la terre est échauffée par le soleil, les couches inférieures de l'air participent à la haute température du sol; de nombreux courans s'établissent avec plus ou moins de régularité: il en résulte dans l'air une espèce de tremblement ondulatoire très sensible à l'œil, et tous les objets éloignés ne donnent plus que des images mal définies, qui semblent se briser et se recomposer à chaque instant. Ce phénomène, qui s'observe aussi dans nos climats pendant les chaleurs de l'été, n'est pas encore le phénomène du mirage: si le vent ne souffle pas, et si les couches d'air, qui reposent sur la plaine, restent parfaitement immobiles pendant qu'elles s'échauffent au contact de la terre, alors le phénomène du mirage se développe dans toute sa magnificence. L'observateur qui regarde au loin distingue encore l'image directe des éminences, des villages et de tous les objets un peu élevés; mais au-dessous de ces objets il voit leur image renversée, et cesse par conséquent de voir le sol lui-même sur lequel ils reposent.

Ainsi tous les objets élevés paraissent comme s'ils étaient au milieu d'un lac immense, et l'aspect du ciel vient compléter cette illusion, car on le voit aussi comme on le verrait par réflexion sur la surface d'une eau tranquille. A mesure que l'on avance on découvre le sol et la terre brûlante, au même lieu où l'on croyait voir l'image du ciel ou de quelque autre objet; puis au loin, devant soi, l'on retrouve encore le même tableau sous un autre aspect. Ce phénomène a été souvent observé pendant l'expédition de l'armée française en Égypte. C'était un spectacle bien nouveau pour nos soldats, et en même temps une illusion bien cruelle. Quand ils voyaient au loin, sur les plaines brûlantes, le reflet du ciel, l'image renversée des maisons, des palmiers et de tous les objets de l'horizon, ils ne pouvaient douter que toutes ces images ne fussent réfléchies à quelque distance sur la surface d'un lac. Fatigués par des marches forcées, sous l'ardeur du soleil, dans un air chargé de sable, ils couraient au rivage, mais ce rivage fuyait devant eux: c'était l'air échauffé de la plaine qui prenait l'apparence de l'eau, et qui donnait cette image réfléchie du ciel et de tous les objets élevés de la terre. Témoins de ce phénomène, les savans de l'expédition eurent, comme toute l'armée, un instant d'illusion, mais cet instant fut court: Monge en découvrit sur-le-champ la cause et en développa toutes les circonstances. C'est, comme nous allons le voir, un jeu particulier de la réfraction.

676. *Explication du mirage.* — Supposons que λ représente la surface horizontale du sol lorsqu'elle est fortement échauffée par la chaleur solaire (Fig. 782), l'expérience prouve que les couches inférieures de l'air ont une densité croissante à mesure que l'air s'élève, qu'à une certaine hauteur cette densité devient à peu près constante, puis qu'elle décroît ensuite, conformément aux lois ordinaires de la constitution de l'atmosphère. Cela

posé, concevons un point élevé π , et examinons comment sa lumière doit être modifiée pour arriver à l'œil que nous supposons placé en r ; il est évident d'abord que l'œil verra une image directe du point π par les rayons voisins $r\pi$; ces rayons, il est vrai, ne viendront pas en lignes absolument droites, puisque entre r et π l'air n'a pas absolument la même densité; mais ils ne pourront éprouver que de légères inflexions, et il en résultera seulement une certaine irrégularité dans les contours de l'image.

Mais parmi les rayons que le point π envoie dans tous les sens, il s'en trouvera qui suivront la route $\pi r x l \pi \pi o r$, et qui donneront par conséquent dans la direction $r o z$ une image renversée de l'objet, comme s'il y avait réflexion sur un miroir. En effet, le rayon πr , par exemple, arrivant obliquement pour pénétrer dans la couche c' , qui est moins réfringente que la couche c dans laquelle il se trouve, doit se réfracter en s'écartant de la normale. Par la même raison, il doit s'écarter aussi de la normale en passant de la couche c' dans la couche c'' , et s'en écarte encore en passant de celle-ci dans la suivante. Ainsi, l'obliquité augmentant sans cesse, il pourra bien arriver qu'à la fin le rayon ne puisse plus passer du milieu réfringent où il est dans le milieu moins réfringent auquel il se présente, alors il sera forcé de se réfléchir, et continuant sa route vers l'œil, il arrivera dans la direction $\pi s o r$: l'œil verra donc le point π dans la direction $r o z$ et dans une position à peu près symétrique du point π , par rapport au plan πr , sur lequel est causé se faire la réflexion.

La marche du rayon est ici tracée en ligne brisée; mais comme la densité va croissant par degrés insensibles depuis la surface, on conçoit que le rayon se dévie aussi par degrés insensibles et qu'il suit une ligne courbe et non une ligne brisée.

Tel est le principe de l'explication du mirage donnée par Monge en présence même du phénomène; elle a été publiée dans les mémoires de l'Institut d'Égypte.

Voici une expérience qui n'imité le mirage que bien faiblement, mais qui peut servir cependant à en faire comprendre l'explication.

cc', (Fig. 788), est une caisse de tôle, ayant environ 30 pouces de longueur sur 6 ou 8 pouces, tant en largeur qu'en hauteur. On la remplit de charbon allumé, on la suspend à la hauteur de l'œil, et par un rayon visuel qui rase les bords de la caisse, on regarde une mire un peu éloignée, telle que π . Alors on voit une image directe de la mire dans la direction $r\pi$, puis on voit une image renversée dans la direction $r\pi'$. C'est cette seconde image qui est analogue aux images renversées du mirage; elle est évidemment produite par la réflexion de la lumière sur les couches d'air chaud qui avoisinent la paroi de la caisse, et non pas par une réflexion qui aurait lieu sur la paroi elle-même. Il est indifférent pour le succès de l'expérience que

le rayon visuel rase une paroi latérale ou la paroi supérieure.

Wellaston a encore imaginé une autre expérience, par laquelle on produit le mirage dans un liquide. On prend un petit vase en cristal de forme ronde ou carrée, on y superpose, avec tous les soins convenables, deux liquides d'inégale densité qui puissent se combiner lentement près de la couche de superposition : l'eau et l'acide sulfurique, l'eau et l'alcool, l'eau et le sirop de sucre concentré, peuvent très bien remplir cet objet. Quand la combinaison est opérée bien parallèlement dans une couche d'une épaisseur suffisante, on approche l'œil vis-à-vis cette couche pour regarder une petite mire, disposée sur la paroi opposée, et l'on voit aussi une image droite de cette mire et une image renversée. Cet effet est représenté dans la figure 787.

877. *Phénomènes de mirage observés en différents lieux et dans diverses circonstances.*

A Ramsgate, le docteur Vince a observé un effet remarquable du mirage. Lorsque de Ramsgate on regarde du côté de Douvres, on aperçoit, par un beau temps, les sommets des quatre plus hautes tours du château de Douvres; le reste de l'édifice est caché par une colline dont la crête se trouve à peu près à deux milles de l'observateur; la moitié de cet espace est occupée par la surface de la mer. Le docteur Vince, établi à Ramsgate à peu près à 70 pieds au-dessus de la surface de la mer, fut fort surpris, le 6 août 1806, lorsqu'en regardant du côté de Douvres, vers sept heures du soir, il aperçut non-seulement les quatre tours du château, comme à l'ordinaire, mais le château lui-même dans toutes ses parties et jusqu'à sa base. On le voyait, dit-il, aussi distinctement que s'il eût été tout d'une pièce transporté sur la colline du côté de Ramsgate.

Le même physicien a publié beaucoup d'autres observations qu'il a faites du même lieu, et particulièrement en regardant sur la mer, avec un bon télescope, les vaisseaux qui s'approchaient ou s'éloignaient de Ramsgate. Nous citerons encore les deux observations suivantes :

Un jour il aperçut un vaisseau qui était précisément à l'horizon; il se distinguait nettement : mais en même temps il en vit une image renversée, très régulière et disposée verticalement au-dessus de lui, de telle sorte que le sommet du mât réel et le sommet du mât de l'image se traversaient en coïncidence. (Fig. 785.)

Une autre fois, toujours dans le même mois d'août, et vers le soir, il vit un autre effet : l'image du vaisseau était encore renversée, mais au-dessous de lui. (Fig. 786.)

Le capitaine Scoresby a eu l'occasion d'observer un grand nombre de phénomènes analogues dans les mers du Groënland. Dès que le soleil se montre dans ces parages, les couches d'air qui reposent sur le sol ou sur la surface de la mer, atteignent promptement une température beaucoup plus haute

que les couches d'air qui sont à quelques pieds de hauteur, et les réfractions extraordinaires se présentent sous les apparences les plus variées et les plus fantastiques.

MM. Biot et Mathieu ont fait des observations analogues, à Dunkerque, sur les bords de la mer, dans la plage sablonneuse qui s'étend au pied du fort Risban. M. Biot en a donné la théorie détaillée dans les mémoires de l'Institut pour 1809; il a fait voir qu'à partir d'un certain point r , pris à quelque distance au devant de l'observateur o , (Fig. 784), on peut concevoir une courbe rcz , telle que tous les points qui sont au-dessous d'elle restent invisibles, tandis que tous les points qui sont au-dessus, jusqu'à une certaine hauteur, deviennent deux images, l'une ordinaire et directe, l'autre extraordinaire inférieure à sa couche et renversée. Ainsi un homme qui s'éloigne de l'observateur en partant du point r , lui offre les apparences successives qui sont représentées sur la fig. 784.

MM. Soré et Jurine ont observé sur le lac de Genève, en septembre 1818, à 10 heures du matin, le phénomène remarquable qui est représenté dans la figure 783. La courbe asc représente la rive orientale du lac; une barque chargée de tonneaux, ayant ses voiles déployées, était en r , vis-à-vis la pointe de Belle-Rive, et faisait route pour Genève; les observateurs l'apercevaient avec un télescope dans la direction or ; ils étaient au bord du lac, au deuxième étage de la maison de Jurine, à une distance d'environ deux lieues. Pendant que la barque prit successivement les positions q, n, s , on vit une image latérale très sensible en q', n', s' , qui s'avauçait comme la barque elle-même, mais qui semblait s'écarter à gauche de or , tandis que la barque elle-même s'en écartait à droite. Quand le soleil éclairait les voiles, cette image était assez éclatante pour être aperçue à l'œil nu.

La direction des rayons solaires au moment de l'observation est indiquée en ly .

Il suffit de connaître la position des lieux pour voir à l'instant que c'est un phénomène de *mirage latéral*; à droite de or , l'air était resté dans l'ombre pendant une partie de la matinée; à gauche, au contraire, il avait été échauffé par le soleil; la surface de séparation de l'air chaud et de l'air froid devait être à peu près verticale dans une petite étendue au-dessus de l'eau; de part et d'autre de cette couche s'était fait un mélange de densité croissante en allant de gauche à droite; et il se produisait, dans les couches verticales, ce qui se produit ordinairement sur le sol dans des couches horizontales.

Ces exemples seront suffisants pour donner une idée des apparences indéfiniment variées ou singulièrement bizarres qui peuvent résulter des réfractions extraordinaires que la lumière éprouve dans des couches d'air dont les densités changent rapidement. Nous avons supposé que ces changements s'accomplissaient dans des couches planes et régulières.

res, mais l'on conçoit qu'ils pourraient souvent, par une foule de causes, s'accomplir dans des couches courbes et irrégulières; alors les images produites par le mirage seront déformées dans tous les sens, tantôt élargies, tantôt allongées outre mesure et quelquefois dispersées comme si l'objet lui-même était brisé en mille pièces. On ne peut pas douter que le phénomène connu sous le nom de *Fato Morgona* ne soit un effet du mirage. Il s'observe à Naples, à Reggio et sur les côtes de la Sicile. A certains moments le peuple se porte en foule sur le rivage de la mer, pour jouir de ce singulier spectacle : on voit dans les airs à de grandes distances, des ruines, des colonnes, des châteaux, des palais, et une foule d'objets qui semblent se déplacer, et qui changent d'aspect à chaque instant. Toute cette lèerie n'est qu'une représentation de quelques objets terrestres, qui sont invisibles dans l'état ordinaire de l'atmosphère, et qui deviennent apparents et mobiles quand les rayons de lumière qu'ils envoient se meuvent en lignes courbes dans les couches d'air d'inégales densités.

Arc-en-ciel.

678. *Explication du phénomène de l'arc-en-ciel.* — Tout le monde a pu remarquer que pour voir un arc-en-ciel il faut tourner le dos au soleil et regarder une nuée qui se résout en pluie, et qui en même temps est vivement éclairée par la lumière solaire. Alors l'arc coloré qui se développe dans les airs peut être considéré comme faisant partie de la base d'un cône, dont le sommet est dans l'œil de l'observateur, et dont l'axe prolongé par derrière va passer précisément par le centre du soleil. Il est facile de s'assurer que cette condition est toujours remplie, soit pour les beaux arcs-en-ciel que donne la pluie des nuées, soit pour les arcs-en-ciel bien moins complets dans leur étendue que donne la pluie des cascades ou celle des jets d'eau. Elle indique même la position qu'il faut choisir dans ces derniers cas pour voir briller les couleurs dans toutes les gouttelettes flottantes qui sont formées par la chute de l'eau et ensuite disséminées par le vent.

D'après toutes ces apparences du phénomène, on ne peut douter qu'il ne soit produit par une modification particulière que la lumière solaire éprouve dans les gouttes d'eau. Nous allons voir en effet que les couleurs qu'on aperçoit sont apportées dans l'œil par des rayons qui viennent directement du soleil après avoir été réfractés, réfléchis et décomposés dans ces petites parcelles aqueuses dont la forme est parfaitement sphérique.

Pour prendre une juste idée de la marche des rayons solaires dans un cercle liquide, on peut faire l'expérience suivante :

vi', (Fig. 739.) représente une coupe horizontale du volet de la chambre noire, il est percé d'une très petite ouverture o. A quelque distance derrière ce volet et à la hauteur de l'ouverture, on dispose

un vase de cristal parfaitement cylindrique et rempli d'eau; la figure représente seulement la coupe horizontale de ce vase. Ensuite on fait entrer un rayon solaire dans la direction oi, et l'on regarde d'en haut sa marche dans l'intérieur de l'eau; ce liquide sera toujours assez peu limpide pour que la trace de la lumière s'y trouve sensiblement marquée. Il sera facile de voir que le rayon parcourt la route i, a, c, d, e, f, g, h, i, et qu'à chaque incidence sur la paroi il éprouve à la fois une réflexion et une réfraction; c'est par les réflexions qu'il continue sa route dans le liquide, et par les réfractions qu'il diminue d'intensité en donnant naissance aux faisceaux émergents a', b', c', d', e', f', g', h', i', qui sont tous des spectres plus ou moins étalés, comme si le faisceau avait traversé un prisme. Après quatre ou cinq réflexions, ces faisceaux émergents auront encore une intensité sensible.

Ce qui arrive ici se reproduit indubitablement dans une goutte de pluie sphérique, quelque petite qu'elle soit, car le premier plan d'incidence détermine dans cette sphère un grand cercle, dans lequel se mouvra le rayon, comme dans la section du cylindre de l'expérience précédente.

Cela posé, voici la propriété fondamentale sur laquelle repose l'existence de l'arc-en-ciel. Concevons un rayon qui sort après avoir éprouvé une réflexion intérieure en a (Fig. 790); sa direction d'émergence ac fera avec sa direction d'incidence sa, un certain angle ste, que nous désignerons par d; c'est ce que l'on appelle la *déviation*. Si l'on désigne par i l'angle d'incidence s a n et son égal o a t par r, l'angle de réfraction o a n et son égal o a s, on aura évidemment :

$$ORA = RAT + RTA,$$

$$\text{ou. . . . } r = i - r + \frac{d}{2},$$

$$\text{d'où. . . . } d = 4r - 2i.$$

Or, la propriété dont il s'agit, c'est que cette déviation est susceptible d'un *maximum*. On le démontre par les règles ordinaires du calcul différentiel, en remarquant que les quantités *i* et *r*, qui varient ensemble, sont liées entre elles par la relation

$$\sin. i = n \sin. r;$$

et l'on trouve ainsi que cette valeur maximum de la déviation a lieu pour une incidence *i*, déterminée par la relation

$$\cos. i = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}}$$

Admettons ces résultats du calcul, et essayons seulement de faire comprendre comment cette propriété du maximum détermine la production des couleurs. Considérons d'abord de la lumière rouge.

Pour cette nuance du spectre, l'indice de réfraction est :

$$n = \frac{108}{81}.$$

En substituant cette valeur dans l'expression précédente de $\cos. i$, nous en déduisons :

$$i = 59^{\circ} 23' 30''.$$

C'est-à-dire que le rayon rouge, qui tombe sous cette incidence, est de tous les rayons rouges incidents celui qui éprouve la déviation maximum; et cette déviation est de $42^{\circ} 1' 40''$. Supposons que nous avons tracé sa route, $s_a a c$ (Fig. 790), et que nous voulons examiner ensuite la route des deux rayons voisins, qui tombent, l'un avec une obliquité un peu moindre, et l'autre avec une obliquité un peu plus grande. Puisque leurs rayons émergents s et s' ont une déviation un peu moindre que celle de s , il est évident qu'ils sont sensiblement parallèles à s ; par conséquent, le petit pinceau composé de ces rayons émergents se propagera sans diminuer d'intensité, et il pourra ainsi produire une vive impression sur l'œil du spectateur. Au contraire, tout autre pinceau émergent, étant composé de rayons qui *divergent*, diminue nécessairement d'intensité en s'éloignant, et devient insensible à la distance où l'œil du spectateur peut le recevoir.

Tel est le principe délicat sur lequel nous allons nous appuyer pour expliquer maintenant avec la plus grande facilité toutes les circonstances que peut présenter l'arc-en-ciel dans sa grandeur, dans sa forme et dans l'arrangement de ses couleurs.

Pour mieux fixer les idées, supposons que les rayons du soleil couchant éclairent une nuée de pluie, et qu'un observateur soit convenablement placé pour regarder la nuée en tournant le dos au soleil (Fig. 793). Concevons une ligne droite qui passe par le centre du soleil et par l'œil de l'observateur qui se prolonge à l'infini vers l'orient; dans notre supposition, cette ligne sera horizontale. Concevons ensuite une seconde ligne qui coupe la première dans l'œil de l'observateur, et qui fasse avec elle un angle de

$$42^{\circ} 1' 40'' ,$$

et qui se prolonge indéfiniment dans la nuée; imaginons enfin que cette seconde ligne tourne autour de la première sans cesser de remplir les conditions précédentes, et décrive ainsi une surface conique dont nous avons à considérer seulement la moitié supérieure. Cette ligne, dans chacune de ses positions, rencontrera une foule de gouttes de pluie. Mais arrêtons notre pensée sur celles qu'elle rencontre sous l'angle d'émergence qui donne le maximum de déviation pour la lumière rouge. Soit $a c$ l'une de ces gouttes; le pinceau de lumière qu'elle reçoit du centre du soleil est horizontal et parallèle

à en , dans tous les rayons qui le composent. Il y a un certain rayon $s a_1$ qui, après avoir été successivement réfracté en a , réfléchi en s , puis réfracté en c , vient sortir dans la direction $s c$ avec la déviation maximum; car $s a$ étant parallèle à en , l'angle $s t c$ est de

$$42^{\circ} 1' 40'' ,$$

comme l'angle $s en$.

Donc, dans cette direction, l'observateur apercevra la lumière rouge du spectre.

Ce que nous venons de dire par rapport au centre du soleil s'applique à tous les points du disque de cet astre; et en répétant la même construction pour chacun d'eux, et particulièrement pour les deux bords opposés, qui sont vus de la terre sous un angle de $30'$, il est évident que l'observateur, voyant une ligne rouge pour chaque point du soleil, verra pour leur ensemble une bande rouge s'étendant à l'œil un angle de $30'$, comme le disque du soleil lui-même.

Nous allons maintenant chercher la cause des autres couleurs de l'arc-en-ciel et de leur arrangement.

La lumière violette, par exemple, ayant, dans son passage de l'air dans l'eau, un indice de réfraction de $\frac{109}{81}$, il est évident que, pour elle, le

maximum de déviation n'est pas le même que pour la lumière rouge, et qu'il correspond à une autre incidence. En mettant pour n cette valeur $\frac{109}{81}$ dans l'expression précédente,

$$\cos. i = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}}.$$

on trouve :

$$i = 58^{\circ}$$

pour le violet

$$n = 40^{\circ} 17'.$$

Ainsi, pour avoir la position de l'arc violet, il faut mener par l'œil de l'observateur une ligne faisant avec en un angle de

$$40^{\circ} 17' ;$$

et il est évident d'ailleurs que la bande violette sera vue comme la bande rouge d'une largeur correspondante à $30'$.

Toutes les couleurs intermédiaires du spectre donneront aussi des bandes de même largeur; mais elles seront placées à des hauteurs intermédiaires entre celle du rouge et celle du violet.

Il sera facile de déterminer par le calcul la véritable position de toutes ses bandes, l'étendue dans laquelle elles se superposent, et par conséquent les teintes qui doivent en résulter vers le milieu de l'arc-en-ciel.

On voit donc, comme conséquence définitive de cette discussion, que toutes les couleurs de l'iris sont sur des surfaces coniques plus ou moins ouvertes, ayant toutes pour axe commun la ligne menée par le centre du soleil et par l'œil de l'observateur; que le cône du violet est à l'intérieur, faisant avec l'axe un angle de $40^{\circ} 17'$; que le cône du rouge est à l'extérieur, faisant avec l'axe un angle de $42^{\circ} 2'$; que la largeur totale des couleurs occupe par conséquent une étendue de $1^{\circ} 45'$.

Newton, qui a donné le premier une explication complète de l'arc-en-ciel, a vérifié tous ces résultats par l'expérience.

Quant à l'étendue de l'arc coloré que l'on aperçoit, il est évident qu'elle dépend de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon. Au coucher du soleil, l'arc sera vu à l'orient, et formera une demi-circonférence entière pour l'observateur qui sera dans la plaine; mais il pourrait former plus d'une demi-circonférence pour l'observateur qui serait au sommet d'une haute montagne sur un pic élevé et d'une petite largeur. Au lever du soleil, les mêmes phénomènes se reproduisent du côté de l'occident. Plus le soleil est élevé sur l'horizon, et moindre est l'étendue de l'arc que l'on aperçoit. Cependant, du haut d'un grand mât d'un vaisseau, le soleil étant directement au zénith, on pourrait voir, à ses pieds, sur la mer, un arc-en-ciel d'une circonférence entière.

Outre l'arc-en-ciel dont nous venons de parler, on observe quelquefois un second arc-en-ciel, que l'on appelle *extérieur*, parce qu'il enveloppe le premier. Il est produit par la lumière qui a éprouvé deux réflexions intérieures, comme on peut le voir dans la figure 792.

s A C D E est la marche du rayon qui donne l'arc-en-ciel extérieur; il entre dans la direction *s* A, et il sort dans la direction *s* E.

Il est facile de voir que la déviation *s* T E, que nous appellerons *n'*, est alors donnée par l'équation

$$n' = 6r - 2i - 180^{\circ},$$

et que son maximum correspond à une incidence déterminée par

$$\cos. i = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{8}}.$$

En faisant les calculs pour la lumière rouge et pour la lumière violette, dont les indices de réfraction sont toujours,

$$n = \frac{108}{81} \text{ pour le rouge,}$$

$$n = \frac{109}{81} \text{ pour le violet,}$$

on trouve les résultats suivants :

Rouge $i = 71^{\circ} 50'$, $r = 45^{\circ} 27'$, $n' = -50^{\circ} 59'$.

Violet $i = 71^{\circ} 26'$, $r = 44^{\circ} 47'$, $n' = -54^{\circ} 9'$.

Le signe moins, qui précède les valeurs de *n'*, annonce que les rayons incidents et émergents se rencontrent au devant du globe d'eau.

Ainsi, dans le second arc-en-ciel, le rouge est en dedans, et le violet en dehors. Les couleurs sont développées sur une étendue de $3^{\circ} 10'$. C'est une largeur presque double de celle du premier arc. Enfin l'intervalle compris entre le rouge intérieur du second arc et le rouge extérieur du premier est donné par la différence des déviations correspondantes, c'est-à-dire qu'il est égal à

$$50^{\circ} 59' - 42^{\circ} 2' \text{ ou à } 8^{\circ} 57'.$$

Newton avait aussi pris des mesures exactes qui confirment ces résultats.

Il paraît que, dans des circonstances extrêmement favorables, on a quelquefois observé un troisième arc-en-ciel; mais sa lumière est toujours très affaiblie, parce qu'elle a éprouvé un plus grand nombre de réflexions intérieures dans les gouttes de pluie.

La lune peut donner des arcs-en-ciel comme le soleil, surtout quand elle est pleine et qu'elle brille de tout son éclat. Il arrive cependant, même dans ces circonstances, que les couleurs sont toujours très pâles, lorsqu'on les compare aux couleurs des arcs-en-ciel solaires.

Des halos.

679. Les halos sont des cercles brillants et ordinairement colorés que l'on voit quelquefois autour du disque du soleil ou de la lune; on les appelle aussi des couronnes. L'astre occupe le centre, et l'espace compris entre ses bords et l'intérieur des cercles lumineux forme l'*aire* du halo. Cet espace est d'un gris plus intense ou d'un bleu plus foncé que le reste du ciel, suivant que l'atmosphère est brumeuse ou d'une transparence plus ou moins parfaite.

On a mesuré souvent en divers lieux et à diverses époques le diamètre apparent des halos, et on a toujours trouvé qu'il s'étend à l'œil de l'observateur un angle compris entre 45° et 46° . Autour de la lune, le halo est simplement formé d'un cercle lumineux blanc, sans couleurs tranchées, excepté un rouge pâle qui borde quelquefois l'intérieur de ce cercle. Autour du soleil, les couleurs, sans être aussi vives que celles de l'arc-en-ciel, sont en général assez distinctes. Le rouge est en dedans; il paraît tranché, et limite brusquement l'aire du halo; l'indigo et le violet sont en dehors; leur teinte, toujours assez vague, va s'éteindre dans la couleur du ciel.

Dans quelques circonstances, on observe un second halo beaucoup plus grand que le premier, mais concentrique avec lui, son diamètre paraît en général être de 90° ou à peu près; ses couleurs sont très pâles, et son éclat total est beaucoup moindre que l'éclat du halo intérieur.

Descartes, Huyghens, Mariotte et beaucoup

d'autres physiciens ont essayé d'expliquer ce phénomène.

Descartes l'attribue aux rayons transmis au travers de certaines petites étoiles que l'on observe dans la neige, et qui peuvent devenir assez transparentes lorsque la chaleur commence à les fondre. « Ces étoiles, dit-il, sont toujours renflées vers leur milieu, et leur convexité la plus ordinaire est sans doute celle qui détermine le diamètre de 45° , que prennent les halos. » Dans cette hypothèse, les couronnes extérieures seraient produites par des rayons qui seraient traversés deux rangées de petites étoiles convexes.

Huyghens imagine que les halos sont produits par de petits globules transparents, ayant un noyau opaque. Ces globules seraient d'eau ou de glace, et le noyau opaque serait de la neige comprimée comme celle du grésil. Mais, pour obtenir le diamètre constant de 45° , il faudrait évidemment qu'il y eût toujours un rapport déterminé entre l'épaisseur de la partie opaque et celle de la partie transparente.

Mariotte trouve la cause des halos dans la forme des petites aiguilles transparentes et prismatiques qui composent la neige. Cette dernière hypothèse est la plus vraisemblable, et nous allons essayer de la développer.

En se congelant, l'eau prend des formes cristallines très régulières, et parmi toutes ces formes, on en rencontre très souvent dont les faces font entre elles des angles de 60° , et qui constituent par conséquent des prismes de glace dont l'angle réfringent est de 60° . Ces prismes, quand ils existent, sont sans doute tournés dans les airs de toutes les manières possibles, et reçoivent par conséquent les rayons solaires sous toutes les inclinaisons. Or nous avons vu (528) que, dans certaines positions des prismes, la lumière éprouve en les traversant une déviation minimum; cette position est déterminée par la condition que le rayon réfracté fasse un triangle isocèle avec les deux côtés du prisme, ou, ce qui revient au même, que l'angle de réfraction soit égal à la moitié de l'angle réfringent. Comme l'angle réfringent est ici de 60° , l'angle de réfraction devra être de 30° , et par conséquent l'angle d'incidence d'environ 41° . Dans ce cas, la déviation est égale au double de l'angle d'incidence diminuée de l'angle réfringent, ce qui donne ici :

$$2.41 - 60 = 82 - 60 = 22^\circ \text{ environ ;}$$

c'est à peu près le demi-diamètre du halo.

On peut donc concevoir qu'un observateur étant placé en τ (Fig. 794) lorsque les rayons directs arrivent dans la direction τ , tous les petits prismes de 60° flottant dans les hauteurs de l'atmosphère qui seront convenablement tournés, comme le prisme α β , réfractent vers l'œil un petit pinceau très éclatant, parce qu'il sera composé de rayons sensiblement parallèles à cause de la con-

dition du minimum, et le même phénomène se reproduisant dans un cône de 22° tout autour de la ligne τ , menée au centre du soleil, l'observateur verra une couronne ayant 44° de diamètre.

Le rapport de réfraction de la lumière violette étant plus grand que celui de la lumière rouge, on aura pour cette espèce de rayons une déviation plus grande et par conséquent une couronne un peu plus large.

Enfin, le diamètre du soleil, qui est de $30'$, contribuera lui-même à donner encore plus de largeur aux bandes colorées.

Cette explication pourrait être mise à une épreuve sévère, s'il était possible de mesurer les diamètres des halos avec la même exactitude que les diamètres des diverses couleurs de l'arc-en-ciel; mais il est malheureusement très rare que le phénomène se présente avec toute la régularité et toute la netteté qui seraient nécessaires pour en mesurer les dimensions.

Cependant M. Arago a fait un autre genre d'observation qui prouve au moins d'une manière certaine que la lumière des halos est de la lumière réfractée; en étudiant, par des procédés particuliers, l'état dans lequel se trouve cette lumière par rapport à la polarisation, il a reconnu qu'elle est toujours polarisée par réfraction et non par réflexion.

Le halo extérieur peut être expliqué de bien des manières; mais il y a encore trop d'incertitude sur ses véritables dimensions pour qu'il nous semble permis de hasarder ici une théorie de sa formation.

Il reste sans doute encore beaucoup de recherches intéressantes à faire sur ce phénomène; mais on peut affirmer dès à présent, d'après l'observation de M. Arago, que la condition nécessaire pour qu'il se produise est la présence de particules glacées dans les hautes régions de l'atmosphère. Cette conclusion est d'autant plus importante qu'elle nous fournit une donnée de plus sur la température de l'air à de grandes hauteurs, pendant les diverses saisons de l'année; et l'on peut inviter les observateurs à noter la température ambiante toutes les fois qu'ils auront occasion d'apercevoir des halos; soit autour du soleil, soit autour de la lune. Lors des expériences de M. Arago, la température ambiante était de 15° à l'Observatoire de Paris.

Parhélies ou faux-soleils.

680. N'ayant en aucune occasion d'observer ces phénomènes ni d'en faire une étude particulière, je me contenterai de rapporter ici (d'après M. Biot) la description qui en a été donnée par les témoins oculaires, et l'explication un peu hasardée que l'on doit à Huyghens.

Les parhélies consistent dans l'apparition simultanée de plusieurs soleils, images fantastiques du soleil véritable. Ces images se montrent toujours sur l'horizon à la même hauteur que le vrai soleil,

et elles sont toujours unies les unes aux autres par un cercle blanc pareillement horizontal, dont le pôle est au zénith. Ce cercle monte et descend sur l'horizon en même temps que le vrai soleil, et son demi-diamètre apparent est toujours égal à la distance de cet astre au zénith. Les images du soleil qui paraissent sur ce cercle, du même côté que le soleil véritable, présentent les couleurs de l'arc-en-ciel, et quelquefois le cercle lui-même est coloré dans la partie qui les avoisine. Au contraire, les images qui se forment du côté du cercle opposé au soleil sont toujours incolores; d'où l'on peut conjecturer qu'elles sont produites par réflexion, ainsi que le grand cercle, et les autres par réfraction. En outre, quand ces phénomènes se produisent, on voit ordinairement autour du soleil une ou plusieurs couronnes circulaires concentriques qui offrent les couleurs de l'arc-en-ciel; et enfin on voit quelquefois naître sur ces couronnes mêmes, ou sur les points du grand cercle, d'autres linéaments d'arcs pareils, et même des arcs tout entiers. L'apparition de ce météore la plus complète que l'on connaisse est celle que Hevelius a observée à Dantzick le 20 février 1661. Elle est représentée *fig. 795*.

Pour concevoir la manière dont ces phénomènes peuvent se produire, il faut, comme l'a fait Huyghens, considérer d'abord ce cercle blanc, horizontal, qui entoure le zénith, et sur lequel se trouve toujours le vrai soleil (*Fig. 795 bis*). La blancheur de ce cercle, uniformément constatée dans toutes les observations de ce genre, indique qu'il est produit par réflexion; alors le problème se réduit à ceci : Supposant un nombre infini de corpuscules suspendus dans l'air, quelle forme faut-il leur attribuer pour que les rayons solaires réfléchis sur leurs surfaces forment toujours avec l'horizon le même angle que les rayons incidents dont ils dérivent ? Il est évident que cette condition ne peut être remplie qu'en donnant aux corpuscules la forme de petits cylindres verticaux; et en effet, si l'on suppose que le soleil éclaire une infinité de pareils cylindres, il en résultera nécessairement un cercle blanc horizontal qui aura son pôle au zénith, et dont le demi-diamètre sera le complé-

ment de la banteur du soleil sur l'horizon. Maintenant, pour satisfaire au phénomène des soleils colorés qui paraissent de part et d'autre du soleil véritable, il suffit de supposer ces cylindres formés d'une partie extérieure transparente et d'un noyau cylindrique opaque; car alors, par une réfraction latérale, opérée perpendiculairement à leur axe, ils produiront un effet analogue à celui des globules de grêle dans les couronnes, et avec plus d'éclat encore, à cause de leur forme allongée et du parallélisme de leur disposition, d'où résulteront les apparences des soleils colorés. Enfin, si l'on suppose, comme il est très vraisemblable, que les extrémités de ces cylindres soient l'une et l'autre arrondies, ils produiront dans ce sens les effets résultants de la sphéricité, et de là pourront naître les couronnes colorées concentriques au soleil véritable. Or Descartes assure, dans le livre des météores, qu'il a quelquefois observé de pareils cylindres de grêle renfermant un noyau intérieur neigeux, opaque, et pareillement cylindrique. Enfin Huyghens a pour ainsi dire imité cette formation par l'expérience, en plaçant à diverses distances angulaires de son œil et du soleil un cylindre de verre mince rempli d'eau, avec un noyau cylindrique opaque dans l'intérieur, et il a vu se réaliser ainsi, par l'expérience, tous les phénomènes que le calcul lui avait indiqués. Il a également montré comment ces calculs représentaient avec fidélité les circonstances caractéristiques du phénomène. Mais pour atteindre les derniers détails de l'observation d'Hevelius, il lui a fallu distribuer dans l'atmosphère, sous beaucoup de positions diverses, les corpuscules cylindriques et globulaires qu'il avait imaginés. Cette complication, qui paraît inhérente à ce genre de phénomènes, ne doit pas être une raison de rejeter l'idée d'Huyghens, mais plutôt un encouragement à observer exactement leurs apparences, pour pouvoir les lui comparer. La loi de la double réfraction, si long-temps méconnue, nous a appris qu'il ne fallait pas traiter légèrement les spéculations d'un génie si élevé, et Newton lui-même paraît les avoir adoptées dans cette circonstance, puisqu'en parlant des parabélies qui ont l'Optique, il renvoie à l'explication d'Huyghens.

CHAPITRE V.

DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

1751. *Première découverte sur l'électricité atmosphérique.* — Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg, et célèbre inventeur de la machine pneumatique, fut le premier qui découvrit quelque apparence du lumière électrique. Le docteur Wall,

presque à la même époque, en excitant l'électricité sur un grand cylindre d'ambre, observa une étincelle plus vive et un bruit beaucoup plus fort; et, chose digne de remarque, cette première étincelle produite par la main des hommes fut à l'ins-

tant comparée aux éclats de la foudre : cette lumière et ce craquement, dit Wall dans son *Mémoire* (*Trans. philos.*), paraissent en quelque façon représenter le tonnerre et l'éclair. L'analogie était frappante, il ne fallait que de l'imagination pour la saisir : mais pour en démontrer la vérité, pour trouver dans un phénomène si petit, les causes et les lois du plus grand phénomène de la nature, il fallait une série de preuves que l'on ne pouvait attendre que d'un génie supérieur. Cependant plusieurs physiciens cherchaient ces preuves dans des rapprochemens plus ou moins ingénieux ; les uns remarquaient que l'étincelle est crochue comme l'éclair, d'autres pensaient que le tonnerre est entre les mains de la nature ce que l'électricité est entre les nôtres : « J'avoue que cette idée me plairait beaucoup, disait l'abbé Nollet, si elle était bien soutenue ; et, pour la soutenir, combien de raisonnemens spécieux, etc. » Enfin tout se passait en raisonnemens qui ne pouvaient rien conclure, parce qu'en physique c'est l'expérience seule qui doit donner ses conclusions. Pendant que l'on raisonnait ainsi en Europe et dans tout l'ancien monde savant sur cette grande question, l'on expérimentait en Amérique, chez un peuple nouveau à peine connu dans les sciences, et ces expériences s'attaquaient directement à la foudre. Franklin trouvait le moyen de la faire descendre du ciel pour l'interroger elle-même sur son origine. Après avoir fait plusieurs découvertes électriques, particulièrement sur la bouteille de Leyde et sur le pouvoir des pointes, Franklin eut la pensée hardie d'aller chercher l'électricité au sein des nuages ; il avait conclu de quelques expériences décisives qu'une tige de métal pointue, élevée à une grande hauteur, au sommet d'un édifice, devait recevoir l'électricité des nuées orageuses. Il attendait avec une grande anxiété la construction d'un clocher que l'on devait à cette époque élever à Philadelphie ; mais lassé d'attendre et impatient d'écouter une expérience qui devait lever tous les doutes, il eut recours à un autre moyen plus expéditif et non moins sûr pour les résultats. Comme il ne s'agissait que de porter un corps dans la région du tonnerre, c'est-à-dire à une assez grande hauteur dans les airs, Franklin imagina que le cerf-volant, dont s'amusaient les enfans, pouvait lui servir aussi bien qu'aucun clocher que ce pût être. Il prépara donc deux bâtons en croix, un mouchoir de soie, une corde d'une longueur convenable, et profitant du premier orage, il s'en fut dans les champs tenter l'expérience. Une seule personne l'accompagnait : c'était son fils ; craignant le ridicule dont on ne manque pas de couvrir les essais infructueux, comme il le dit avec ingénuité, il n'avait voulu mettre personne dans sa confidence.

Le cerf-volant était lancé. Un usage qui promettait beaucoup n'avait produit aucun effet ; d'autres nuages s'avançaient, et l'on peut juger de l'inquiétude avec laquelle ils étaient attendus. Tout

paraissait tranquille, on ne voyait aucune étincelle, aucun signe électrique ; à la fin cependant quelques filemens de la corde commençaient à se soulever comme s'ils eussent été repoussés ; un petit bruissement se fit entendre : encouragé par ces apparences électriques, Franklin présente le doigt à l'extrémité de la corde et voit paraître une vive étincelle qui fut bientôt suivie de plusieurs autres. Ainsi, pour la première fois, le génie de l'homme fut se jouer avec la foudre et surprendre le secret de son existence.

L'expérience de Franklin eut lieu en juin 1752 ; elle fut répétée dans tous les pays savans et partout avec le même succès. Un magistrat français, De Romas, assesseur au présidial de Nérac, profitant de la première pensée de Franklin, qui avait été publiée en France, avait imaginé aussi de substituer le cerf-volant aux barres élevées ; et dès le mois de juin 1753, avant d'avoir connaissance des résultats de Franklin, il avait obtenu des signes électriques très énergiques, parce qu'il avait eu l'heureuse idée de mettre au fil de métal dans toute la longueur de la corde (*Mém. des savans étrangers*, tom. II). Plus tard, en 1757, De Romas répéta de nouveau ces expériences pendant un orage, et cette fois il obtint des étincelles d'une grandeur surprenante. « Imaginez-vous de voir, dit-il, des lames de feu de 9 ou 10 pieds de longueur et d'un pouce de grosseur qui faisaient autant ou plus de bruit que des coups de pistolet. En moins d'une heure j'en ai certainement trente lames de cette dimension, sans compter mille autres de 7 pieds et au-dessous (*Savans étrangers*, tom. IV). »

Malgré toutes les précautions bien entendues que prenait cet habile expérimentateur, il fut une fois renversé par la violence du choc.

Ces résultats démontrent d'une manière assez éclatante que la foudre n'est en effet qu'une étincelle électrique.

Les cerfs-volans qui ont servi à prouver cette identité peuvent servir à beaucoup d'autres expériences qu'il serait bon de tenter maintenant pour l'avancement de la science. Cependant leur usage ne peut jamais être assez ordinaire pour qu'il convienne d'en donner ici la description.

682. *De l'électricité pendant les orages.* — En étudiant l'état électrique des nuages qui passent successivement au-dessus d'un cerf-volant, on reconnaît par expérience qu'ils sont chargés, les uns d'électricité vitrée, les autres d'électricité résineuse, et il s'en trouve qui sont à l'état naturel. Bien que nous ne sachions rien sur l'arrangement de l'électricité dans l'intérieur des nuages et à leur superficie, nous pouvons cependant conclure avec certitude qu'ils se repoussent quand ils ont la même électricité, et qu'ils s'attirent quand ils ont des électricités contraires. Ces attractions et ces répulsions ont sans doute pour quelque chose dans les mouvemens extraordinaires que l'en

observe dans le ciel au moment des orages : le vent n'est plus alors la seule puissance qui emporte les nuages ; son influence est modifiée par les actions électriques qui s'exercent avec plus ou moins d'énergie sur ces amas considérables de vapeurs : aussi les voit-on s'approcher rapidement en s'éloignant comme s'ils étaient poussés en sens contraire, en tournant sur eux-mêmes, comme si le vent qui les emporte n'était lui-même qu'un vaste tourbillon. C'est au milieu de cette agitation générale de l'atmosphère que l'on voit briller l'éclair et que l'on entend retentir les éclats du tonnerre. Essayons de rendre compte de ces deux phénomènes, de la lumière et du bruit.

On voit quelquefois l'éclair fendre la nue et sillonner une grande étendue du ciel ; lorsque, du haut des montagnes, on observe ce phénomène à ses pieds, on peut mieux juger encore de l'espace qu'il occupe, et tous les observateurs s'accordent à dire qu'ils ont vu des éclairs qui avaient certainement plus d'une lieue de longueur. On sait aussi que les mêmes nuages suspendus dans les mêmes régions du ciel peuvent donner successivement plusieurs éclairs ; ainsi pour reprendre leur état naturel ils se comportent autrement que les corps conducteurs électrisés. Enfin tout le monde sait que la trace de l'éclair est presque toujours une courbe en zig-zag, dont les plus sont plus ou moins développés ou plus ou moins rapprochés. Ces trois phénomènes, de la forme de l'éclair, de ses apparitions répétées et de sa longueur ne peuvent pas être complètement expliqués dans l'état actuel de la science.

La forme en zig-zag est commune à l'éclair et à l'étincelle : il suffirait d'une seule explication pour les deux cas ; mais j'avoue qu'à ma connaissance il n'y a rien de satisfaisant sur ce sujet.

Les amas de vapeur qui constituent les nuages ne sont pas des corps conducteurs comme des masses métalliques ; et sans savoir comment l'électricité se distribue et se met en équilibre sur ces conducteurs imparfaits qui ont souvent plusieurs lieues de superficie, il est évident qu'il ne suffirait pas de les mettre un instant en contact avec le sol pour les décharger complètement ; et il est impossible par conséquent qu'une seule étincelle les remette à l'état naturel. Ainsi au sein du même nuage on verra nécessairement briller plusieurs éclairs.

La longueur de l'éclair paraît être aussi une conséquence de l'imparfaite conductibilité des nuages et de la mobilité de leurs parties constituantes. Pour se rendre compte de ce phénomène il ne faut pas comparer l'électricité des nuages à celle d'une batterie électrique. Ici, lorsque les deux électricités dissimulées font effort pour se rejoindre, elles ne peuvent jamais franchir qu'un très petit espace : par exemple, la plus forte charge de la plus forte batterie en part pas à 3 ou 4 centimètres. Et il est facile d'en voir la raison : tant que les points qui se rapprochent pour fermer le circuit entre l'intérieur et l'extérieur de la batterie restent un peu éloignés,

les électricités ne s'y présentent jamais qu'en très faible partie, parce qu'elles sont retenues dans l'intérieur des jarres par leur attraction mutuelle au travers de l'épaisseur du verre. Il faut donc comparer l'électricité des nuages aux électricités qui sont *libres* sur la surface des corps plus ou moins conducteurs. Nos meilleures machines peuvent donner l'étincelle à 30 ou 36 pouces au travers d'un air très sec ; mais si l'on met quelques poussières métalliques sur une étoffe de laines ou de soie, on pourra faire partir l'étincelle à une distance plus grande. Si nous avions à notre disposition des machines assez puissantes pour qu'un léger bromillard autour de leurs conducteurs ne diminuât pas sensiblement leur tension, il est évident que les particules conductrices suspendues dans l'air feraient le même effet que les parcelles métalliques dans l'expérience précédente. Il me semble donc que, pour expliquer la longueur de l'éclair, il faut concevoir que, sur la route que l'éclair va prendre, les parcelles de vapeur et peut-être même les parcelles d'air se trouvent déjà électrisées par les influences contraires des électricités qui tendent à se précipiter l'une vers l'autre ; et qu'à un instant donné l'équilibre est à la fin rompu sans qu'il y ait transport de fluide de l'un des nuages sur l'autre, mais seulement transport successif ou vibration successive de couche en couche sur toute l'étendue que parcourt l'éclair.

Le bruit du tonnerre, dans tous ses éclats et ses roulements formidables, n'est pas plus difficile à expliquer que la craquement de la plus petite étincelle. C'est la vibration de l'air ébranlé avec plus ou moins d'intensité. Quand la décharge d'une batterie passe au travers d'une masse liquide, elle la refoule et la projette dans tous les sens ; quand la décharge d'une simple bouteille de Leyde passe au travers d'un gaz, tout le fluide est ébranlé et il y a augmentation de volume, comme on peut le voir avec le thermomètre de Kinnorsley. Ces données suffisent pour expliquer le bruit de l'étincelle et celui du tonnerre ; on peut toutefois en tirer deux explications, dont une seule me semble bonne. On peut dire que le fluide électrique s'ouvre un passage au travers de la matière, comme ferait un projectile en vertu de son impénétrabilité, et qu'ensuite l'air rentre dans le vide formé par le passage instantané du fluide et produit un son comme dans l'expérience du crève-vessie. Suivons, par la pensée, le sillon de l'éclair ; imaginons un tube de verre qui en parcourt tous les replis, qui soit vide d'air et qui occupe exactement toute la trace du fluide ; admettons enfin qu'à un instant donné ce tube soit rompu dans toute son étendue ; le bruit qui en résultera sera le bruit du tonnerre. C'est cette explication qui me semble mauvais, parce que, d'une part, le passage d'un boulet de canon dans les airs devrait produire un bruit analogue, et l'on n'entend cependant qu'une espèce de sifflement que le soldat le plus timide n'a jamais comparé au bruit

du tonnerre; d'une autre part toutes les expériences indiquent d'une manière positive que jamais le fluide électrique n'éprouve un mouvement de translation analogue à celui des projectiles de matière pondérable. Nous avons déjà insisté sur ce point (377 et 402), qui nous semble fondamental; et les principes que nous avons adoptés sur le passage de l'électricité au travers des corps bons ou mauvais conducteurs, vont nous fournir une autre explication du bruit du tonnerre qui nous semble de tout point en harmonie avec les faits. Quand l'étincelle part entre deux corps, il y a décomposition et recombinaison d'électricité entre toutes les couches où elle paraît, et par conséquent vibration plus ou moins violente dans leur matière pondérable; c'est une espèce de déchirement ou de brusque séparation, comme on le voit dans l'expérience du perce-carte. C'est cette vibration qui fait le bruit en se propageant ensuite dans toute la masse environnante.

Concevons d'après cela le sillon d'un éclair d'une lieue d'étendue ou seulement de 3400 mètres, pour mieux fixer les idées. La lumière brille au même instant dans toute cette étendue: donc c'est au même instant que le bruit est excité dans toutes les couches. Mais le son se propage lentement: il ne parcourt que 340 mètres en 1"; par conséquent pour un observateur qui serait placé sur la ligne de l'éclair à 340 mètres de l'une des extrémités, il y aurait d'abord éclat de lumière, puis silence absolu pendant 1"; alors le bruit commence à l'atteindre; et, ce qu'il entend, c'est la vibration qui a été excitée dans la couche la plus voisine de lui; le bruit des autres couches arrive à la suite, se succède sans interruption et doit durer 10" dans l'hypothèse que nous avons faite, puisque l'autre extrémité de l'éclair est à 3400 mètres. Ainsi c'est la longueur de l'éclair qui détermine la durée du bruit; et pour un observateur qui serait sous la ligne de l'éclair, à peu près vers son milieu, le même coup de tonnerre aurait des roulements moitié moins prolongés que pour un observateur qui serait vers l'une des extrémités de l'éclair: celui-ci n'entendrait qu'un coup, tandis que le premier pourrait croire qu'il entend deux coups à la fois, l'un à droite et l'autre à gauche, car le bruit lui viendrait des deux côtés.

Autant il s'écoule de secondes ou de battements de pouls entre l'apparition de l'éclair et la première impression du bruit, autant de fois il y a 340 mètres de distance entre l'observateur et le point de la trace de l'éclair qui se trouve le plus voisin de lui; quand on a vu l'éclair, tout l'effet du tonnerre est produit; le reste n'est plus que du bruit.

Les mêmes principes nous expliquent encore les éclats déchirants, les roulements prolongés et toutes les périodes de cette redoutable harmonie, qu'un seul coup de tonnerre fait entendre. Dans le trajet de l'éclair, toutes les couches vibrantes ne reçoivent pas la même impulsion, parce qu'elles ne sont

ni à la même température ni au même état de sécheresse ou d'humidité, ni par conséquent sous la même influence électrique. Ainsi la première impression du son ne sera pas toujours la plus intense, bien qu'elle vienne du lieu le plus rapproché, et dans une si grande étendue il est impossible que le son ne se reoiffe pas à plusieurs reprises.

Ces notions suffisent pour faire comprendre ce que le bruit du tonnerre est en lui-même; mais il peut arriver souvent que les forêts, les vallées, les montagnes, ou même les nuages forment des échos pour le répéter.

633. *Des effets du tonnerre lorsqu'il tombe sur la terre.* — Le tonnerre tombe quand l'éclair jaillit entre un nuage et les corps placés à la surface de la terre; on dit alors que ces corps sont *foudroyés*. Dans le langage de la science ce mot n'emporte pas nécessairement une idée de destruction, parce que la foudre ne détruit pas inévitablement tout ce qu'elle frappe. Autrefois on discutait beaucoup sur la question de savoir si la foudre tombe du ciel, ou si elle s'élève de la terre vers les nuages; c'était une sorte de dilemme auquel on croyait ne pouvoir échapper; mais ce que nous avons dit précédemment montre d'une manière assez évidente que jamais la foudre ne tombe et que jamais elle ne s'élève; car il n'y a jamais translation du fluide électrique de l'un à l'autre des deux points extrêmes de l'éclair. Cependant, pour nous conformer à l'usage, nous dirons que le tonnerre tombe, en nous souvenant toutefois du sens qu'il faut attacher à cette expression.

Concevons un nuage orageux, qui soit, par exemple, chargé d'électricité vitrée; son élévation au-dessus du sol sera, comme à l'ordinaire, comprise entre 2000 mètres et 6000 mètres; il aura une forme quelconque, une épaisseur et une étendue considérables. Supposons d'abord que ce nuage soit au-dessus de la mer ou d'un grand lac. Par son influence, il décompose les électricités naturelles de la masse liquide, repousse le fluide vitré dans la profondeur du sol, et attire le fluide résineux à la surface des eaux. L'accumulation de ce fluide peut y être assez grande pour qu'il y ait soulèvement sensible; et alors on voit une grande vague ou une montagne liquide qui s'élève et qui reste suspendue aussi long-temps que dure l'action électrique. Mais ce phénomène peut se terminer de trois manières: 1^o S'il n'y a aucune explosion dans le nuage orageux, il s'éloigne avec plus ou moins de rapidité; l'intensité de son action diminue à mesure que la distance augmente, le fluide résineux, moins attiré, repasse peu à peu dans le sol, et toute la masse des eaux retombe à l'état naturel. 2^o S'il y a une explosion entre le nuage orageux et quelque autre nuage voisin, ou même entre le nuage orageux et quelque autre point de la terre, éloigné de la surface liquide que nous considérons ce moment, il est évident que le nuage, déchargé subitement par cette explosion, cessera subitement son action sur

la surface des eaux qu'il avait soulevées, et le liquide, forcé de reprendre à l'instant son état naturel, retombera sur lui-même avec violence, son électricité résineuse se précipitant dans les profondeurs de l'eau et du sol pour se recombinaison avec la vitrée dont elle avait été séparée. Dans ce cas l'eau est foudroyée par le choc en retour, dont nous avons déjà parlé (338); elle est foudroyée sans que la foudre tombe; c'est-à-dire sans qu'il y ait explosion entre elle et le nuage orageux. Si le nuage orageux est assez près, assez volumineux ou assez fortement électrisé, pour que l'étincelle parte entre un point de sa surface et la surface des eaux qu'il avait électrisée par influence, alors l'eau est foudroyée directement, ou, comme on le dit ordinairement, le tonnerre tombe dans l'eau. Cette explosion produit en général plus d'effervescence et de bouillonnement dans les eaux que le choc en retour; une telle secousse n'a pas lieu entre les fluides électriques sans qu'il y ait une violente action mécanique dans ses éléments pondérables. Chacun de ces effets, que nous décrivons longuement, peut être produit en un instant, et même il ne faut qu'un instant pour les produire successivement.

Après avoir pris pour exemple une masse mobile, homogène, et d'une égale conductibilité électrique dans toutes ses parties, il nous sera facile de comprendre l'effet du nuage orageux sur une vaste plaine composée d'éléments hétérogènes et diversement conducteurs. Les électricités naturelles du sol seront encore décomposées par influence; le fluide vitré sera encore refoulé, et le fluide résineux attiré et accumulé vers la partie supérieure du sol. Mais, dans le cas présent, il ne faut pas nous arrêter à la superficie, il faut pénétrer par la pensée dans toutes les couches qui constituent le sol, jusqu'à une assez grande profondeur, démêler les bons et les mauvais conducteurs, et reconnaître enfin leur forme, leur étendue et leur arrangement. Toutes ces circonstances ont une part plus ou moins marquée dans le phénomène. Il est évident, par exemple, que, s'il y avait à quelques pieds au-dessous du sol une couche métallique d'une grande étendue, l'action du nuage serait plus énergique, la quantité d'électricité accumulée beaucoup plus grande, et l'étincelle partirait plus tôt; alors la croûte supérieure du sol serait percée par la foudre en un ou plusieurs points, comme la carte en le carreau de verre dans nos expériences avec les batteries. Cette comparaison suffit pour nous faire comprendre que, dans les vastes plaines, la nature du sol, son état de sécheresse ou d'humidité, et la conductibilité des masses plus ou moins volumineuses que ses couches peuvent contenir, sont des éléments qui déterminent l'explosion de la foudre et les effets extraordinaires qu'elle produit. Dans ce cas le nuage orageux peut encore n'exercer qu'une action par influence, foudroyer par le choc en retour ou foudroyer directement.

Il ne paraît pas que le premier mode d'action

puisse jamais produire aucun phénomène apparent; il n'y a jamais de secousses quand les électricités sont décomposées lentement et lentement recomposées; il paraît cependant que ces changements d'équilibre électrique peuvent être sentis par les êtres organisés, et particulièrement par les malades affectés de quelques maladies nerveuses. Il faudrait des observations plus précises et plus multipliées sur ce sujet.

Le choc en retour est toujours moins violent que le choc direct. On n'a pas d'exemple à ma connaissance qu'il ait produit quelque combustion; mais il paraît certain que les hommes et les animaux peuvent être frappés de mort par le choc en retour; on n'observe alors ni trace de brûlure, ni plaie, ni fracture.

C'est par le choc direct que la foudre produit ses plus terribles effets. Quand elle tombe sur le sol, elle y marque son passage par un ou plusieurs trous plus ou moins profonds: la terre en est remuée, fouillée et arrachée.

Si quelques petites éminences s'élèvent sur les plaines, elles sont frappées plus tôt parce qu'elles sont plus rapprochées du nuage; par la même raison toute élévation au-dessus du sol est plus exposée aux coups de la foudre; quelques pieds de hauteur de plus suffisent pour déterminer l'explosion; c'est pourquoi les animaux sont souvent frappés au milieu des plaines; mais, toutes choses égales d'ailleurs, ceux qui sont sur un sol mauvais conducteur courent moins de dangers que ceux qui seraient sur un sol bon conducteur.

Considérons enfin l'action du nuage orageux lorsqu'il passe au-dessus de quelques objets élevés, comme des arbres ou des édifices. Si ces objets étaient non conducteurs, leur présence n'aurait aucune influence; le nuage n'exercerait son action que sur le sol; mais, comme ils sont plus ou moins conducteurs, leur électricité est décomposée, et elle l'est en raison de leur conductibilité, de leur forme et de leur élévation. Les arbres, à cause de leur nature et surtout à cause de l'humidité qu'ils contiennent, sont en général d'assez bons conducteurs; et leur cime, toujours plus ou moins rapprochée du nuage, reçoit par conséquent une grande accumulation de fluide. C'est par cette raison que les arbres attirent la foudre, et les plus hauts sont frappés les premiers. On doit donc pendant les orages redouter l'approche d'un arbre et même l'approche d'un buisson, surtout au milieu des plaines; car si la foudre éclate, c'est l'arbre ou le buisson qui sera frappé. Dans les pays couverts, le danger n'est pas le même: il est toujours certain que si le tonnerre tombe, il tombera sur un arbre; mais ou moins il ne tombera pas sur tous: cependant pour chercher un abri au moment du danger, le plus habile observateur serait fort embarrassé de choisir, et ce qu'il aurait de mieux à faire serait sans doute d'éviter les arbres et de se coucher par terre.

Les édifices sont en général composés de métal, de pierre et de bois, qui reçoivent de la part du nuage orageux des actions très différentes à cause de leurs différentes conductibilités. Mais quand la foudre éclate, on conçoit qu'elle frappe de préférence tous les meilleurs conducteurs; il importe peu qu'ils soient à découvert ou qu'ils se trouvent enveloppés dans l'intérieur de quelques masses moins bons conducteurs; l'action par influence n'est empêchée par aucun obstacle; elle se fait sentir sur un clou, au milieu d'une masse de pierres, comme sur une girouette exposée au nuage; c'est ce principe qui explique une foule de phénomènes, d'abord incompréhensibles, que l'on observe dans les explosions de la foudre. Cette puissance semble agir avec une sorte de discernement; elle semble fuir ou respecter un objet qui se trouve sur son passage pour en aller frapper un autre qui est loin et caché; tous les accidents plus ou moins merveilleux que l'on rapporte à cet égard ne présenteront sans doute aucun embarras à l'observateur qui aura bien saisi les principes de la conductibilité et de l'électricité par influence.

Après avoir indiqué les principales causes qui déterminent l'explosion de la foudre à la surface de la terre, nous essaierons d'examiner en général les effets qu'elle produit. Nous distinguerons ici comme dans les phénomènes des piles et des batteries, les effets mécaniques, les effets physiques et les effets chimiques.

Les effets mécaniques de la foudre sont d'une incroyable intensité: quand le tonnerre tombe dans un appartement, il arrive presque toujours que des meubles ou des ustensiles sont déplacés ou renversés; on a vu souvent des pièces de métal arrachées de leurs scellements et transportées au loin; les arbres sont quelquefois fendus et brisés, mais ordinairement ils sont marqués de la cime jusqu'au pied par un sillon de plusieurs poudres de large et de plusieurs poudres de profondeur; alors l'écorce et les fibres arrachées sont lancées à une grande distance. Au pied de l'arbre on voit souvent le tron par lequel les fluides se sont répandus dans le sol; enfin, ce qui paraît sans doute encore plus surprenant, un observateur affirme que par un coup de tonnerre un petit mur de briques de plusieurs toises de longueur a été arraché de ses fondations et transporté tout d'une pièce à plusieurs toises de distance. De tels effets ne peuvent être expliqués par les lois ordinaires des attractions électriques, et nous avons indiqué (387) un principe nouveau qui semble en donner la solution.

Les effets physiques sont plus analogues à ceux que nous pouvons produire avec nos batteries; ils se réduisent à une élévation de température plus ou moins grande. Quand le tonnerre tombe sur des toits de chaume, sur des meules de foin, sur des charpentes sèches, ou même dans certains cas sur des arbres verts, il carbonise les parties qu'il frappe, et trop souvent même il y met le feu et

produit des incendies. Je dois ajouter cependant que dans tous les arbres frappés de la foudre que j'ai eu occasion d'observer, il ne s'en est trouvé qu'un très petit nombre qui offrissent des traces de carbonisation. Les métaux, comme meilleurs conducteurs, sont toujours fortement échauffés par le passage de la foudre; souvent même ils sont fondus ou volatilisés. Ainsi, il n'est pas rare de voir, dans une maison fondroyée, tous les cordons de sonnette réduits en fumée. Ces effets sont connus de tout le monde, mais on devrait en profiter dans la pratique; on devrait prendre garde que dans les fermes ou dans les maisons qui ne sont pas protégées par des paratonnerres, il ne faut qu'une pièce de métal maladroitement placée, pour que le tonnerre en tombant détermine un incendie.

Les effets chimiques sont incomparablement plus intenses que ceux que nous pouvons produire avec nos batteries. Les coups redoublés de la foudre sur les sommets élevés des hautes montagnes laissent des traces de fusion très sensibles. De Saussure en a observé sur la cime du Mont-Blanc, dans l'amphibole schisteux; Ramond, sur le pic du Midi, dans le schiste micacé; près de la cime du Mont-Perdu, sur un calcaire fétide mêlé de sable quartzeux; et enfin au Pay-de-Dôme, dans une espèce de porphyre qui compose la *Roche sanadoire*; enfin MM. de Humboldt et Bonpland ont vu, sur la plus haute cime du volcan de Toluca, la surface du rocher vitrifiée sur une étendue de plus de deux pieds carrés; il y avait même en plusieurs endroits des trous dont l'intérieur offrait la même croûte vitreuse.

Voici un autre phénomène de fusion bien plus remarquable, qui a été observé et décrit avec beaucoup de soin par le docteur Withering (*Transact. phil.*, 1790; et *Ann. de phys. et de chim.*, tom. XIX, pag. 295).

Le 3 septembre 1789, le tonnerre tomba sur un chêne dans le parc du comte d'Aylesford, et tua un homme qui avait cherché un abri sous cet arbre. Le bâton que ce malheureux portait à la main et qui lui servait d'appui, fut, suivant toute apparence, la principale voie que suivit le fluide électrique, puisque le sol dans le point auquel le bâton aboutissait était percé d'un trou de 5 poudres de profondeur et $2\frac{1}{3}$ de diamètre. Ce trou, examiné peu d'instants après sa formation par M. Withering, ne renfermait que quelques racines brûlées du gazon. Là aurait probablement fini les observations si lord Aylesford ne s'était déterminé à faire construire une petite pyramide, dans le lieu même de l'événement, avec une inscription destinée à détourner les passans de chercher, en temps d'orage, un abri sous des arbres. Mais en creusant pour les fondations, on trouva que le sol, dans la direction du tron, avait été noirci jusqu'à la profondeur de 10 poudres. Deux poudres plus bas le terrain quartzeux offrait des traces évidentes de fusion. Les échantillons, adressés à la Société royale avec le

Rémoire du docteur Withering, se composaient :

1° d'une pierre quartzeuse dont un des angles avait été complètement fondu ;

2° D'un bloc de sable agglutiné par la chaleur ; car il n'y avait aucune matière calcaire entre les grains. Dans cette masse existait une partie creuse, où la fusion avait été si parfaite que la matière quartzeuse, après avoir coulé tout du long de la cavité, présentait dans le fond une forme globuleuse ;

3° De plusieurs pièces plus petites, mais toutes également trouées.

Enfin nous devons citer encore comme un effet chimique de la foudre ces tubes singuliers qui ont été découverts dans les plaines sablonneuses de la Silésie, de la Prusse orientale, du Cumberland, et même du Brésil près de Bahia. On les appelle *tubes fulminaires*, et tout nous porte à croire qu'ils sont bien nommés.

Ces tubes ont, en général, 2 pouces de diamètre extérieur, quelques lignes de diamètre intérieur, et jusqu'à 20 ou 30 pieds de longueur ; leur surface intérieure est un verre parfait, uni et très brillant, semblable à l'opale vitreuse ; leur surface extérieure est rugueuse, pleine d'aspérités, et forme une espèce de croûte revêtue de grains de quartz agglutinés comme s'ils avaient éprouvé un commencement de fusion. On les trouve enfoncés dans le sable, tantôt verticalement, tantôt obliquement ; quelquefois ils se terminent à leur extrémité inférieure par plusieurs branches semblables à des racines qui deviennent de plus en plus pointues ; elles ont jusqu'à 1 pied de longueur. Le docteur Fiedler, qui a fait beaucoup d'observations sur ce sujet intéressant (*Annalen der Physik*, GILBERT. tom. LV et LXI), remarque qu'à une certaine profondeur au-dessous de ces plaines de sable, il y a des nappes d'eau, et il considère les tubes fulminaires comme produits par le passage de la foudre, depuis la surface du sol jusqu'au liquide où elle doit être neutralisée. Toutes les circonstances jusqu'à présent observées concourent en effet à faire adopter cette origine des tubes fulminaires.

Si nous avons examiné séparément ces trois effets, ce n'est pas, comme on le pense bien, qu'ils ne soient en général simultanés dans la plupart des explosions ; il y a toujours froissement des parties, élévation de température et par conséquent combinaison chimique si les éléments voisins sont disposés à s'unir ou à se séparer sous ces influences.

Par exemple, quand des corps organisés sont foudroyés, c'est toujours la chaleur et la violence mécanique qui sont les phénomènes les plus apparents. J'ai vu deux malheureux, frappés du même coup de foudre, au milieu d'un champ ; l'un était mort sur le coup, l'autre eut à souffrir encore quelques heures ; leurs vêtements étaient en combustion, de profondes brûlures marquaient le passage des fluides, et le premier avait toute la partie osseuse de la tête brisée comme elle aurait pu l'être par

cent coups de massue. Ces effets effrayans sont ceux qui se reproduisent avec plus ou moins d'intensité dans tous les malheurs de cette espèce qui ont été observés, et dont tous les secours de la science ne peuvent affranchir l'humanité.

Pour donner une idée plus complète de ces terribles effets de la foudre, nous rapporterons ici une relation des malheurs arrivés à *Châteauneuf-les-Moustiers*, le 11 juillet 1810. Cette relation fut adressée à l'Académie des sciences par M. Tranchesi, vicaire général de Digne.

« Il y a un village appelé Châteauneuf, dans l'arrondissement de Digne, département des Basses-Alpes, au sud-est, et limitrophe de la petite ville de Moustiers, connue par une manufacture de faïence, dont l'émail et la qualité justifient la préférence qu'on lui accorde sur toutes celles du royaume. Il est situé au sommet et à l'extrémité de l'une des premières montagnes des Alpes qui forment un amphithéâtre sur Moustiers. Il consiste en quatorze maisons réunies au presbytère et à l'église paroissiale, sur une éminence coupée par les angles de deux autres montagnes, l'une au levant et l'autre au couchant. L'intervalle qui sépare le village de la montagne du levant est si étroit et si profond, que l'aspect en est effrayant. Cent cinquante habitations sont dispersées en bameaux ; presque tous sur le penchant de la montagne du levant, et forment une population de cinq cents âmes.

« Le 11 juillet 1810, jour de dimanche, M. Salomé, curé de Moustiers et commissaire-épiscopal, alla à Châteauneuf pour y installer un nouveau recteur. Vers les dix heures et demie, on se rendit en procession de la maison curiale à l'église. Le temps était beau. On remarquait seulement quelques gros nuages. La messe fut commencée par le nouveau recteur.

« Un jeune homme de dix-huit ans, qui avait accompagné M. le curé de Moustiers, chantait l'épître, lorsqu'on entendit trois détonations de tonnerre qui se succédèrent avec la rapidité de l'éclair. Le missel lui fut enlevé des mains et mis en pièces ; il se sentit lui-même serré étroitement au corps par la flamme, qui le prit de suite au cou. Alors, par un mouvement involontaire, ce jeune homme, qui avait d'abord jeté de grands cris, ferma la bouche, fut renversé, roulé sur les personnes rassemblées dans l'église, qui toutes avaient été terrassées et jetées ainsi hors la porte. Revenu à lui, sa première idée fut de rentrer dans l'église pour se rendre auprès de M. le curé de Moustiers, qu'il trouva évanoui et sans connaissance. Ce jeune homme fixa sur ce respectable et infortuné pasteur l'attention et les soins de ceux qui, légèrement blessés, pouvaient donner des secours. On le releva ; on éteignit la flamme de son surplis, et par le moyen du vinaigre on le rappela à la vie environ deux heures après son étourdissement. Il vomit beaucoup de sang. Il assure n'avoir pas entendu le tonnerre, et n'avoir rien su de ce qui se passait. On le porta au presby-

tière. Le fluide électrique avait touché fortement la partie supérieure du galon d'or de son étole, coulé jusqu'au bas, enlevé un de ses souliers qu'il porta à l'extrémité de l'église, et brisa la boucle de métal. Le siège sur lequel il était assis fut brisé.

» Le surlendemain, M. le curé fut transporté dans son presbytère, à Moustiers, pour être pansé de ses blessures, qui n'ont été cicatrisées que deux mois après. Il avait une escarre de plusieurs travers de doigt à l'épaule droite; une autre s'étendant du milieu postérieur du bras du même côté jusqu'à la partie moyenne et extérieure de l'avant-bras; une troisième escarre, profonde, partait de la partie moyenne et postérieure du bras gauche, et allait jusqu'à la partie moyenne de l'avant-bras du même côté; une quatrième plus superficielle et moins étendue au côté externe de la partie inférieure de la cuisse gauche, et une cinquième sur la lèvre supérieure jusqu'au nez. Il a été fatigué d'une insomnie absolue pendant près de deux mois; il a eu les bras paralysés, et souffre des différentes variations de l'atmosphère.

» Un jeune enfant fut enlevé des bras de sa mère et porté à six pas plus loin. On ne le rappela à la vie qu'en lui faisant respirer le grand air. Tout le monde avait les jambes paralysées. Toutes les femmes, échevelées, effraient un spectacle horrible. L'église fut remplie d'une fumée noire et épaisse. On ne pouvait distinguer les objets qu'à la faveur des flammes des parties de vêtements allumés par la foudre.

» Huit personnes restèrent sur la place; une fille de dix-neuf ans fut transportée sans connaissance à sa maison, et expira le lendemain matin, en proie aux douleurs les plus horribles, à en juger par ses hurlements, de sorte que le nombre des personnes mortes est de neuf; celui des blessés est de quatre-vingt-deux.

» Le prêtre célébrant n'eut point atteint de la foudre, sans doute parce qu'il avait un ornement en soie.

» Tous les chiens qui étaient dans l'église furent trouvés morts dans l'attitude qu'ils avaient auparavant.

» Quoiqu'on ne puisse pas suivre de l'œil toutes les opérations subtiles du fluide électrique, on peut quelquefois en juger par les effets.

» Une femme, qui était dans une cabane, à la montagne de Barbin, au couchant de Châtenueuf, vit tomber successivement trois masses de feu, qui semblaient devoir réduire ce village en cendres.

» Il paraît que la foudre frappa d'abord la croix du clocher, qu'on trouva plantée dans la fente d'un rocher, à une distance de 16 mètres. Le feu électrique pénétra ensuite dans l'église par une brèche qu'il fit à la voûte, à la distance d'un demi-mètre de celle par où passe la corde d'une cloche; la chaire fut écrasée. On trouva dans l'église une excavation d'un demi-mètre de diamètre, prolongée

sous les fondemens du mur jusque sur le pavé de la rue, et une autre qui retraits sous les fondemens d'une écurie qui est en dessous, et où l'on trouva morts cinq moutons et une jument.

» M. Dupelloux, préfet du département, a donné des preuves de sa sollicitude et de son humanité en faisant distribuer des secours en tout genre aux pauvres habitans qui avaient été victimes de cet événement malheureux.

684. *De l'origine de l'électricité atmosphérique et de la formation des nuages orageux.* — La question de l'origine de l'électricité atmosphérique est peut-être de toutes les grandes questions dont s'occupe la météorologie, celle qui a donné naissance au plus grand nombre de dissertations et d'hypothèses plus ou moins singulières. D'habiles observateurs ont essayé de la résoudre par la voie de l'expérience; De Saussure et Volta s'en sont occupé avec ce zèle et cette rare sagacité qu'ils portaient dans tous leurs travaux, et s'ils ne sont pas parvenus à des résultats décisifs, s'ils n'ont pas mis au jour la vérité, ils ont du moins indiqué où il fallait la chercher. J'ai repris, en 1825, la question au point où ils l'avaient conduite, et j'ai découvert deux grandes sources d'électricité qui sont les deux principales causes de l'électricité atmosphérique. On pourra voir tout le détail des expériences dans deux mémoires qui ont été publiés (*Ann. de Phys. et de Chim.*, 1827). Nous essaierons seulement d'en donner ici un extrait.

Électricité produite par la végétation. Les gaz dégagent de l'électricité lorsqu'ils se combinent, soit entre eux, soit avec les corps solides ou liquides; et dans ces combinaisons, l'oxygène dégage toujours l'électricité positive et le corps combustible, quel qu'il soit, l'électricité négative. Cette proposition générale a été démontrée par un grand nombre d'expériences, entre lesquelles je rapporterai seulement les suivantes, parce qu'elles sont très faciles à répéter.

Charbon. Un cylindre de charbon est disposé comme on le voit dans la figure 807; sa base inférieure communique au sol, sa base supérieure est enflammée; l'acide carbonique qui se forme et qui s'élève vient frapper contre une plaque de laiton établie en communication avec le plateau supérieur du condensateur; le plateau inférieur communique au sol. Après quelques instans, les communications sont rompues, les plateaux séparés et les lames divergent par l'électricité négative; donc en se formant l'acide carbonique est électrisé positivement.

Pour faire l'expérience inverse, on dispose le cylindre de charbon comme dans la figure 808, en prenant soin que sa base touche bien la plaque de laiton; alors les lames sont électrisées positivement; donc en brûlant, le charbon prend l'électricité négative.

On peut favoriser l'expérience en activant la combustion avec un tube et une vessie remplie

d'oxygène, mais il faut dans tous les cas maintenir la combustion dans la base supérieure et empêcher qu'elle ne gagne les parois latérales.

Hydrogène. Une flamme verticale d'hydrogène est approchée d'une petite spirale en platine (*Figure 809*), qui communique au plateau supérieur du condensateur; l'autre plateau communique au sol; les lames divergent par l'électricité négative, donc la *partie extérieure* de la flamme est électrisée positivement. On peut même remarquer que la spirale prend l'électricité positive à 8 ou 10 millimètres de distance de la flamme.

Pour faire l'expérience inverse, on dispose la spirale comme dans la *figure 810*, alors elle prend l'électricité négative, donc la *partie inférieure* de la flamme est électrisée négativement. Il est bon que le tube, à l'extrémité duquel on allume le gaz, soit en verre, et pour la seconde expérience il est souvent nécessaire de presser la vessie plus vivement, afin que la spirale soit bien enveloppée par les couches de la flamme qui sont en combustion.

Ces expériences ont été faites sur beaucoup d'autres corps, et tous les résultats démontrent la proposition générale que nous avons énoncée. On peut même en conclure qu'un seul gramme de charbon, en passant à l'état d'acide carbonique, dégage assez d'électricité pour charger une forte bouteille de Leyde. La végétation est accompagnée de combinaisons gazeuses tout-à-fait analogues aux précédentes, et il était naturel de supposer qu'elle ne peut s'accomplir sans dégagements d'électricité. Cependant, pour une conclusion aussi importante, il m'a semblé nécessaire de recourir à des expériences directes.

Douze capsules en verre, et vernies extérieurement, ont été disposées sur un plateau verni dans un petit appartement où l'on avait répandu de la chaux vive pour faire une atmosphère sèche et peu conductrice de l'électricité. On a mis dans les capsules de la terre végétale et des graines qui devaient germer rapidement; on les a fait communiquer entre elles par des fils métalliques (*Fig. 806*): la première communiquait au plateau inférieur du condensateur; le plateau supérieur communiquait au sol; et l'expérience était abandonnée à elle-même; on essayait deux ou trois fois par jour l'état électrique du condensateur.

C'est par ces expériences directes qu'il a été constaté que dans l'acte de la végétation il se dégage de l'électricité, et que sur une surface en pleine végétation de 100 mètres carrés il se dégage en un jour plus d'électricité vitrée qu'il n'en faudrait pour charger la plus forte batterie.

Électricité produite par l'évaporation. L'eau pure évaporée lentement ou rapidement ne donne jamais le moindre signe d'électricité; tous les autres changements d'état que j'ai eu occasion d'étudier m'ont conduit au même résultat, et la première

conséquence de mes recherches est que les changements d'état, quels qu'ils soient, ne sont jamais accompagnés de dégagement d'électricité.

Mais quand l'évaporation n'est pas seulement un changement d'état, quand les molécules liquides en se vaporisant doivent se séparer de quelques éléments hétérogènes auxquels elles sont chimiquement agrégées; alors cette séparation chimique dégage de l'électricité, les éléments hétérogènes prenant l'un des fluides, et la vapeur s'élève avec le fluide contraire. Parmi les expériences qui ont été faites pour démontrer ce principe nouveau, nous citerons les suivantes.

Un creuset de platine parfaitement net est porté successivement à diverses températures depuis 40 ou 50°, jusqu'au rouge ou même au rouge-blanc. Dans l'un de ces états, on le pose sur un disque ou dans un anneau qui communique immédiatement avec le plateau supérieur du condensateur; le plateau inférieur communique au sol; et tout étant à l'état naturel on projette dans le creuset, au moyen d'une pipette, quelques gouttes d'une faible dissolution de chaux de strontiane ou de barite; l'évaporation se fait, elle est lente ou rapide, suivant la température du creuset; mais dans tous les cas, le condensateur se charge d'électricité. Cette charge est quelquefois si grande qu'on l'observe sans faire communiquer le condensateur au sol; les lames d'or sont projetées vivement jusqu'aux parois de la cloche.

C'est par des expériences analogues qu'il a été démontré :

1° Que jamais un liquide pur ne donne de l'électricité en changeant d'état;

2° Que les solutions faibles ou concentrées des alcalis solides, tels que la strontiane, la chaux, la barite, etc., donnent de l'électricité par la ségrégation chimique qui accompagne l'évaporation. La vapeur d'eau prend l'électricité résineuse et l'alcali l'électricité vitrée;

3° Que les solutions faibles ou concentrées des gaz, des acides et de la plupart des sels donnent pareillement de l'électricité par la ségrégation chimique qui accompagne l'évaporation; mais pour ces corps c'est au contraire la vapeur d'eau qui prend l'électricité vitrée, et la solution prend l'électricité résineuse.

La conséquence de ces résultats se présente d'elle-même. De toutes les évaporations qui s'accomplissent sans cesse dans la nature, soit sur les continents, soit sur les mers, il n'en est aucune qui ne doive produire de l'électricité, car il n'en est aucune qui ne soit accompagnée d'une ségrégation chimique.

Ainsi la végétation et l'évaporation, voilà les deux grandes sources de l'électricité atmosphérique. Ces causes, plus ou moins actives en chaque lieu, en chaque contrée, suivant les périodes des saisons, sont en même temps constantes tout autour du globe dans le cours d'une année. Ces pé-

riodes locales et cette constance universelle qui se montrent dans les causes, se reproduisent aussi dans les effets. Dans les divers climats, il y a diverses saisons pour les orages, mais dans toute l'étendue de l'atmosphère, il se détruit chaque année par les explosions de la foudre une certaine quantité d'électricité qui reste à peu près la même; c'est donc cette quantité constante d'électricité qui est aussi reproduite chaque année.

L'acide carbonique et les vapeurs en se mêlant à l'air répandent et dispersent, dans toute l'étendue de l'atmosphère, les fluides électriques, qu'ils ont pour un instant empruntés à la terre. Ainsi toutes les régions atmosphériques sont dans un état électrique habituel, mais cet état varie d'une région à l'autre : ici c'est l'électricité vitrée qui domine, là c'est l'électricité résineuse; à côté se trouve peut-être une région presque sans tension électrique ou à l'état naturel.

Les observations constatent en effet cet état électrique habituel de l'atmosphère. En 1753, pendant une sécheresse de six semaines, depuis la mi-septembre à la fin d'octobre, Lemonnier observa chaque jour de l'électricité dans l'atmosphère, et cependant la sérénité du ciel fut à peine troublée par quelques nuages durant tout cet intervalle. Les expériences de De Sausure, Erman, Volta, et d'un grand nombre d'habiles physiciens confirment ce résultat. On croit même, et c'est une opinion assez généralement adoptée, on croit que sous un ciel serein l'électricité de l'air est plus ordinairement positive, et qu'elle augmente d'intensité à mesure que l'on s'élève. Les diverses séries d'expériences que j'ai eu occasion de faire ne conduisent pas à une conséquence aussi absolue; c'est un sujet de recherches très intéressant pour les météorologistes. Il se pourrait bien au reste que l'air serein fût électrisé positivement dans certaines saisons, et négativement dans d'autres, et peut-être aussi cet état électrique n'est-il pas le même dans tous les climats.

Les appareils nécessaires à ces recherches ne sont ni dispendieux ni embarrassants : un petit électroscope suffit pour indiquer les fortes charges. On peut l'armer d'une pointe ou même d'une baguette assez longue, au bout de laquelle on met un morceau d'amadou enflammé. Lorsque cet instrument ne donne aucun signe d'électricité, il n'en faudrait pas conclure que l'air est à l'état neutre; mais il faut alors employer un condensateur plus ou moins sensible; l'un de ses plateaux communique au sol pendant l'expérience, et l'autre communique par un fil de métal à une baguette isolée ou même à une longue perche, à l'extrémité de laquelle on allume de l'amadou ou une mèche soufrée. Dans ce cas, il faut avoir soin de ne pas prendre pour de l'électricité de l'air celle qui serait développée par la combustion. Enfin, pour prouver que l'électricité va en croissant à mesure que l'on s'élève, il ne suffit pas d'obtenir de plus fortes

charges à mesure que le sommet de la perche s'élève plus haut; il y a plusieurs autres considérations dont il faut tenir compte, mais dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici.

D'après ces données, il est facile de comprendre comment se forment les nuages orageux, et comment ils prennent les uns l'électricité positive, les autres l'électricité négative. Toutes les vapeurs, en si prodigieuse quantité, qui se réunissent pour composer un nuage, y portent nécessairement leur propre électricité. Ainsi la même quantité de fluide électrique, qui était disséminée dans une immense étendue de l'atmosphère, se trouve concentrée dans l'espace occupé par le nuage. Là elle acquiert par conséquent une tension beaucoup plus grande. Si cette vapeur est électrisée positivement, le nuage sera positif, et il sera négatif si la vapeur est elle-même négative.

Les nuages orageux ne se forment pour l'ordinaire que dans certaines saisons de l'année, et de préférence en certains lieux, parce que l'état électrique de l'air n'a pas la même intensité dans tous les lieux et dans toutes les saisons; et en cet état la vapeur concourt puissamment à produire ces phénomènes, car elle peut acquérir des tensions bien différentes aux diverses températures, et par conséquent former des amas ou des nuages dont la constitution est très différente, soit pour la conductibilité, soit pour les autres propriétés électriques. Mais, il faut l'avouer, si le principe de la formation des nuages orageux ne présente pas de difficultés, les applications en présentent, parce que nous n'avons pas assez de données sur la formation des nuages elle-même.

685. *Des paratonnerres.* — Les paratonnerres se composent d'une tige métallique pointue qui s'élève dans les airs, et d'un conducteur qui descend de l'extrémité inférieure de la tige jusqu'au sol. Les conditions nécessaires pour qu'ils puissent produire leur effet sont : 1° que la pointe de la tige soit bien aiguë; 2° que le conducteur communique parfaitement au sol; 3° que depuis la pointe jusqu'à l'extrémité inférieure du conducteur il n'y ait aucune solution de continuité; 4° que toutes les parties de l'appareil aient des dimensions convenables.

Pour mieux comprendre ce qu'il y a d'essentiel dans chacune de ces conditions, supposons pour un instant qu'elles soient remplies, et examinons l'effet du paratonnerre sur un nuage orageux qui passe au-dessus de lui. Les électricités naturelles de la tige et du conducteur seront décomposées; celle de même nom sera repoussée dans le sol où elle pourra se répandre librement, puisque le conducteur communique parfaitement au sol; celle de nom contraire sera attirée au sommet de la tige, et là elle pourra s'écouler dans l'air par l'extrémité de la pointe; ainsi les deux fluides opposés n'éprouvant nul obstacle à leur circulation dans toute l'étendue de la conduite et nul obstacle à leur écoulement,

l'un dans le sol et l'autre dans l'air, il est évident que l'accumulation d'électricité sur le paratonnerre sera nulle et par conséquent l'explosion impossible. Pendant que le paratonnerre est ainsi en activité, pendant qu'il est traversé par des terrains de fluide électrique, on peut en approcher, on peut même le toucher ou le serrer avec la main sans aucun danger; là où il n'y a point de tension électrique il n'y a point de commotion à craindre. Non-seulement sous les conditions que nous avons admises le foudre ne peut pas tomber sur le paratonnerre, mais nous verrons dans un instant qu'elle ne peut pas tomber à une certaine distance autour de lui; il a une sphère d'activité qui est respectée par le tonnerre.

Supposons maintenant que l'une ou l'autre des trois premières conditions ne soit pas remplie, que l'extrémité de la pointe soit émoussée, que le conducteur communique mal au sol, ou qu'il y ait quelque solution de continuité dans la conduite; alors il est évident non-seulement que l'accumulation de l'électricité est possible sur le paratonnerre; mais qu'elle est inévitable; c'est un conducteur qui se charge et qui peut recevoir une énorme quantité d'électricité; si on en approche, on en peut tirer des étincelles, tantôt faibles, tantôt fortes, quelquefois foudroyantes.

Il y aura danger, mais le danger sera différent suivant les cas. Si c'est la pointe seulement qui est émoussée, et que le tonnerre tombe, il frappera la tige, en pourra fonder l'extrémité, mais ce général il suivra le conducteur et ne fera aucun ravage dans l'édifice.

Si c'est la conduite qui offre des solutions de continuité ou qui communique mal avec le sol, le tonnerre pourra encore tomber et fonder une longueur plus ou moins grande de la tige, mais il est presque certain qu'il se portera aussi latéralement sur tous les corps conducteurs voisins, et qu'il pourra exercer sa destruction comme si le paratonnerre n'existait pas.

Mais il y a plus, un paratonnerre qui présente ces défauts est extrêmement dangereux, même quand le tonnerre ne tombe pas; car du moment que l'accumulation de l'électricité sur la conduite est devenue assez grande, le fluide tend à se porter latéralement sur tous les corps conducteurs voisins, et l'étincelle qui en résulte peut les foudroyer ou les enflammer. On en peut citer un déplorable exemple. En 1753, lorsque le *Romus* faisait en France les belles expériences dont nous avons parlé, Richmann, de l'académie de Saint-Petersbourg, et très habile professeur de physique expérimentale, fut tué subitement par une étincelle à quelque distance d'un paratonnerre qui descendait dans sa maison, et dont il avait interrompu la conduite pour étudier les effets de l'électricité des nuages. Sokolow, graveur de l'académie, vit l'étincelle sortir du conducteur et frapper Richmann au front; elle était, dit-il, grosse comme le poing.

Après avoir indiqué les conditions sous lesquelles un paratonnerre est efficace, et les dangers qu'il y a à négliger ces conditions, il nous reste à faire voir comment on peut les remplir dans la pratique. M. Gay-Lussac, d'après la demande du ministre de l'intérieur et de l'académie des sciences, a publié sur ce sujet une instruction qui ne laisse rien à désirer: tout ce qui est relatif aux effets des paratonnerres et aux détails de leur construction s'y trouve développé avec une clarté parfaite. Nous regrettons de ne pouvoir ici reproduire cet ouvrage dans son ensemble, mais nous devons nous borner à en tirer les données essentielles.

La tige d'un paratonnerre a environ 27 pieds de longueur; elle se compose habituellement de trois pièces ajoutées bout à bout, savoir:

- Une barre de fer de . . . 25 pieds;
- Une baguette de laiton de 22 pouces;
- Une aiguille de platine de 2 pouces.

Leur ensemble forme un cône ou une pyramide qui s'amincit régulièrement jusqu'au sommet, et dont la base a 2 pouces de diamètre (Fig. 796).

L'aiguille de platine est soudée à la baguette de laiton avec de la soudure d'argent, et l'on enveloppe encore la jonction avec un petit manchon de cuivre *x* (Fig. 798).

La baguette de laiton se réunit à la barre de fer au moyen d'un goujon *c* qui entre à vis dans toutes deux (Fig. 796). Ce goujon est ensuite fixé dans chaque par deux goupilles à angle droit.

La barre de fer est quelquefois composée de deux parties pour la facilité du transport; alors ces deux parties s'emboîtent exactement par un tenon pyramidal de 7 à 8 pouces de longueur; une clavette *c* qui les traverse, les maintient fortement unies.

Pour ajuster la tige au-dessus du bâtiment, on perce le toit, et on la fixe avec des brides ou des étriers solides, soit contre un poinçon, soit contre le faitage, soit contre le faitage et un lien *r*, *s* et *t* (Fig. 801). On ne doit s'occuper qu'à lui donner de la solidité, et à empêcher l'eau de s'infiltrer; il n'y a aucune précaution à prendre qui soit relative aux effets de l'électricité.

Au bas de la tige, à trois pouces du toit, on scinde une embase *a* *a'*, destinée à rejeter l'eau.

Un peu au-dessus de l'embase, dans une longueur de 2 pouces, la tige est cylindrique et parfaitement rodée pour recevoir un collier *l* *l'* brisé à charnière (Fig. 797), qui doit unir la tige au conducteur.

Le conducteur est une barre de fer carrée de 7 à 8 lignes de côté, qui se fixe au collier *l* *l'*, au moyen du boulon *s* *s'*, et qui descend ensuite jusqu'au sol; les diverses pièces qui le composent sont assemblées comme on le voit dans la figure 799. Quelquefois au lieu d'une barre de fer on emploie un câble en fil de fer d'une longueur couvenable, et alors il s'ajuste au collier, comme on le voit figure 800.

Pour que le poids du conducteur ne porte aucun

dommage à la couverture, on le fixe sur des pates de 10 en 10 pieds de distance, et à peu près à 5 ou 6 ponce d'élévation; l'une de ces pates est représentée en perspective dans la figure 802, et en coupe dans la fig. 803. Arrivé à la corniche, on le courbe convenablement pour qu'il en prenne le contour sans le toucher, puis on l'applique contre le mur; on peut l'y fixer avec des crampons de distance en distance, et on l'amène jusqu'au sol. C'est alors qu'il faut redoubler de soins et de précautions, car c'est de la perfection, de la conductibilité que l'on va établir entre le conducteur et le sol que dépend toute l'efficacité du paratonnerre.

Si l'on a à sa disposition un puits qui ne tarisse pas, ou, si avec une tarière on peut faire un tron jusqu'à la profondeur où l'eau est permanente, il suffira d'y faire arriver le conducteur, en le divisant en plusieurs branches ou racines. Pour multiplier le contact on mènera le conducteur au puits ou au tron par des tranchées creusées dans la terre, que l'on remplira ensuite avec de la braise de boulanger. On aura de cette manière le double avantage de préserver le fer de la rouille et de le mettre déjà en contact avec cette braise qui est un très bon conducteur.

Lorsque l'on n'aura pas d'eau, il faudra chercher au moins un lieu humide et y mener le conducteur par une longue tranchée, dans laquelle il sera bien enveloppé de braise. On pourra même alors, pour plus de sécurité, former des tranchées perpendiculaires à la première et plus ou moins longues, dans lesquelles on fera passer des ramifications du conducteur. La figure 804 représente une de ces tranchées, dans laquelle on a construit un canal en briques contenant la braise.

S'il est facile de comprendre que la foudre ne peut pas tomber sur un paratonnerre construit d'après ces principes, il n'est pas moins facile de comprendre qu'elle ne peut pas non plus tomber autour de lui jusqu'à une certaine distance. Le fluide qui sort en abondance par le point du paratonnerre se répand dans l'air environnant, et, emporté par la force d'attraction que le nuage orageux exerce sur lui, il arrive au nuage lui-même et neutralise en partie l'électricité contraire dont il est chargé. Ainsi, dès qu'un nuage orageux se trouve assez près du paratonnerre pour agir par influence sur lui et sur les corps conducteurs qui en sont voisins, sa puissance est à l'instant diminuée par l'arrivée du fluide contraire, qui sort en plus ou moins grande abondance de l'extrémité de la tige. Ensuite, à mesure qu'il approche, sa puissance décomposante devient plus énergique, mais en même temps il reçoit de la tige une plus grande quantité d'électricité contraire. Le paratonnerre est donc une arme qui devient plus efficace à mesure que le danger devient plus pressant. Son efficacité n'est pas cependant sans conditions : par exemple, si le paratonnerre était dominé par des corps voisins plus élevés que lui, le nuage orageux exercerait sur ces corps une

action plus grande que sur le paratonnerre, et l'explosion pourrait s'ensuivre. Si la tige du paratonnerre était environnée de corps très bons conducteurs, de charpentes en fer, ou de couvertures métalliques d'une grande étendue, ces corps conducteurs, quoique placés plus bas que la tige, éprouveraient cependant une grande décomposition dans leurs électricités naturelles, et par cela même ils pourraient être frappés de la foudre. Le seul remède qui se présente pour les protéger consiste à les mettre en bonne communication avec la conduite du paratonnerre; car, au moyen de cette communication, les deux fluides contraires pourront s'écouler à mesure qu'ils seront décomposés : celui qui est repoussé s'écoulera dans le sol par la conduite elle-même, celui qui est attiré gagnera le sommet de la tige, et pourra s'écouler librement vers le nuage par l'extrémité de la pointe. Cette théorie si simple condamne comme dangereuse l'invention de quelques praticiens, qui se sont imaginés que sur les édifices à charpente métallique il fallait soigneusement isoler de cette charpente et la tige et toute la conduite du paratonnerre. Heureusement les moyens qu'ils emploient pour obtenir cet isolement sont trop imparfaits pour remplir leur but; et s'ils n'arrivent pas à faire une chose dangereuse, ils font au moins une chose inutile. La théorie veut que l'on fasse précisément le contraire, c'est-à-dire que l'on mette en communication avec le paratonnerre tous les bons conducteurs d'une grande étendue qu'il doit protéger. Avec ces précautions, l'expérience a appris qu'une tige de 27 pieds protégé tout ce qui est autour d'elle dans un cercle de 60 pieds de rayon; ainsi le cercle protégé a un rayon à peu près double de la tige.

656. *De la grêle.* — La grêle est en même temps l'un des fléaux les plus redoutables pour les propriétés agricoles, et l'un des phénomènes les plus embarrassants pour les météorologistes. Nous essaierons d'abord de rapporter toutes les observations précises qui ont été faites sur la grêle elle-même et sur les circonstances qui l'accompagnent, puis ensuite nous exposerons les hypothèses les moins improbables qui ont été faites pour expliquer sa formation. Nous profiterons d'un article très intéressant que M. Arago a publié sur ce sujet dans l'*Annuaire du bureau des longitudes*, pour 1828.

La grosseur la plus ordinaire des grêlons est à peu près celle d'une noisette; il en tombe souvent de plus petits, auxquels on fait peu d'attention, parce que en général ils sont peu dangereux; mais il en tombe trop souvent de beaucoup plus volumineux qui brisent et qui ravagent tout ce qu'ils frappent à la surface de la terre. Nous laisserons de côté les récits des historiens et des chroniqueurs; nous n'admettrons pas avec eux que l'on a vu, sous le règne de Charlemagne, des grêlons de 15 pieds de long sur 6 pieds de large et 11 pieds d'épaisseur, ou que l'on en a vu, sous le règne de Tippu-Saïb, qui étaient gros comme des éléphants; si, chrou-

logiquement, ces exagérations ne remontent pas aux temps fabuleux, on peut bien dire qu'elles remontent scientifiquement; mais tout en restant dans la limite des faits bien observés, nous trouverons encore sur les dimensions de la grêle des résultats assez étonnants. C'est que nous allons rapporter peuvent être considérés comme tout-à-fait authentiques. Leur exactitude est garantie par des physiçons connus.

Halley rapporte que le 9 avril 1697 il tomba, dans le Flinstabro, des grêlons qui pesaient 5 onces.

Robert Taylor a mesuré, le 4 mai 1697, dans le Hartfordshire, des grêlons dont le contour était de 14 poncees; c'est 4 poncees de diamètre.

Parot a vu, le 15 mai 1703, à liers, dans le Perche, des grêlons gros comme le poing.

Montignot ramassa, le 11 juillet 1753, à Toul, des grêlons de 3 poncees de diamètre.

Volta assure que, dans la nuit du 19 au 20 août 1787, parmi les énormes grêlons qui ravagèrent la ville de Côme et ses environs, l'on en trouva qui pesaient 9 onces.

M. Tessier rapporte que le 13 juillet 1788, dans cet orage épouvantable qui traversa la France et les Pays-Bas, il se trouvait des grêlons de 8 onces.

Le docteur Noggerath dit que le 7 mai 1832 il tomba à Bonn des grêlons qui pesaient 12 à 13 onces.

Ces témoignages sont sans doute suffisants pour établir comme un fait incontestable qu'il est tombé dans différents pays des grêlons pesant plus d'une demi-livre.

La forme des grêlons est très variable; ils sont en général arrondis, quelquefois aplatis, et dans le nombre on en trouve très souvent qui sont anguleux ou qui offrent à leur surface des protubérances ou des saillies remarquables.

Les observations sur la structure intérieure de la grêle sont d'une très-haute importance, parce qu'elles peuvent conduire aux causes qui déterminent les progrès de la congélation; mais ce qu'elles ont appris jusqu'à présent se réduit aux remarques suivantes :

Vers le centre des grêlons on trouve en général une espèce de noyau opaque, assez semblable à cette neige plus ou moins spongieuse qui compose le grésil.

Autour du noyau on ne distingue ordinairement qu'une masse congelée plus ou moins épaisse et très sensiblement diaphane.

Quelquefois on reconnaît, dans cette masse, des couches distinctes et pourtant transparentes. D'autres fois on peut y compter plusieurs alternatives de couches diaphanes et opaques; cette circonstance mérite toute l'attention des observateurs.

Enfin, l'on trouve des grêlons qui ont une structure rayonnante à partir du centre, et quelquefois cette structure remarquable enveloppe la structure intérieure, qui est visiblement concentrique; c'est à M. Delors que l'on doit cette observation intéressante, il eut occasion de la faire le 4 juillet 1819,

dans un orage de nuit, qui répandit la désolation sur plusieurs départements de l'ouest de la France.

Le docteur Eversman rapporte qu'en 1825, dans un orage terrible qui couvrit Ordenbourg et ses environs, on recueillit plusieurs grêlons dont le centre ou le noyau était une espèce de pyrite de forme quadrangulaire; le docteur John de Berlin a eu à sa disposition deux échantillons de ces pyrites, dont il a dû faire l'analyse. On ne devrait rien négliger de ce qui peut donner de l'authenticité à de tels faits.

Il m'a semblé depuis long-temps qu'il serait très important de déterminer la température de la grêle à l'instant où elle tombe; j'ai eu occasion de faire seulement deux observations de cette espèce, qui m'ont donné une température comprise entre 3 et 4° au-dessous de zéro.

Après ces remarques sur les dimensions, la forme et la structure des grêlons, nous allons rapporter ce que l'on sait des diverses circonstances qui accompagnent ou qui précèdent la chute du fleau.

La grêle précède ordinairement les pluies d'orage; elle les accompagne quelquefois; jamais, ou presque jamais, elle ne les suit, surtout quand ces pluies ont quelque durée.

Elle tombe toujours pendant très peu de temps, souvent pendant quelques minutes, rarement pendant un quart d'heure.

La quantité de pluie qui tombe des nuages en si peu de temps est prodigieuse; la terre en est quelquefois couverte d'une couche de plusieurs poncees d'épaisseur.

Nous ne dirons rien ici des désastres qu'elle cause; c'est comme une mitraille qui tombe du ciel; elle agit par son poids et par l'impulsion qu'elle a reçue du vent; car il paraît bien certain qu'elle ne reçoit aucune impulsion étrangère. On peut juger des désastres que produisent sur la terre des grêlons d'une demi-livre ou du moins de plusieurs onces, animés d'une vitesse qui peut être presque aussi grande que la vitesse du vent.

La grêle tombe, à ce qu'il paraît, plus ordinairement pendant le jour que pendant la nuit.

Les nuages qui la portent semblent avoir beaucoup d'étendue et beaucoup de profondeur, car ils répandent, en général, une grande obscurité; on croit avoir remarqué qu'ils ont une couleur particulière grise ou roussâtre, et qu'en même temps leur surface inférieure présente d'énormes protubérances, et leur bord des déchirures multipliées.

Plusieurs observateurs pensent que ces nuages sont en général très peu élevés; mais les raisons qu'ils en donnent ne me semblent pas décisives, souvent les habitants des hautes collines voient au-dessous d'eux les nuages qui couvrent de grêle le fond des vallées; dans ce cas, il n'y a nul doute: les nuages sont peu élevés; on a même ainsi une mesure exacte de leur hauteur; mais, dans d'autres cas, il me semble difficile de juger de leur posi-

tion, comme on le fait quelquefois par le temps qui s'écoule entre l'apparition de l'éclair et l'arrivée du bruit du tonnerre; car l'explosion peut avoir lieu au-dessous des nuages qui portent la grêle, et même on peut dire que cela arrive très souvent, à cause de ces petits nuages messagers qu'on observe presque toujours au moment de l'orage, et qui passent avec une grande rapidité sous les nuages principaux.

S'il y a de l'incertitude sur ce point, il ne paraît pas qu'il y en ait sur un autre phénomène qui précède la chute de la grêle de quelques instans, et quelquefois même de plusieurs minutes : c'est un bruissement particulier que l'on entend dans les airs, et que l'on compare au bruit que feraient des sacs de noix qui seraient vivement et violemment entrechoqués.

Enfin la grêle est toujours accompagnée de phénomènes électriques : tantôt le tonnerre se fait entendre avant le bruissement dont nous venons de parler, tantôt il se fait entendre en même temps ou même pendant que les grêlons dévastent la terre par leur chute précipitée.

Pour donner maintenant une idée de l'étendue du ciel et de la terre que ce terrible fléau peut occuper, et de la vitesse avec laquelle il peut se propager, nous rapporterons ici quelques détails sur le fameux orage qui a traversé la France et la Hollande, le 13 juillet 1788. Cet orage est sans doute le plus désastreux, le plus effrayant qui ait jamais été vu dans nos climats; et c'est peut-être aussi celui qui a été le mieux observé. Sur la proposition de M. Tessier, l'Académie nomma des commissaires chargés de faire un rapport sur ce qu'ils pourraient en apprendre, et c'est dans ce rapport rédigé avec un rare talent par M. Tessier, que nous puisons les détails suivans (*Mém. de l'Académie des sciences*, 1790, pag. 803).

L'orage s'est propagé simultanément sur deux bandes à peu près parallèles, l'une orientale et l'autre occidentale.

La première est la plus étroite : sa plus grande largeur est de cinq lieues, sa plus petite d'une demi-lieue, sa largeur moyenne deux lieues et un quart.

La seconde est la plus large : sa plus grande largeur est de cinq lieues, la plus petite de trois lieues, et sa largeur moyenne de quatre lieues.

Elles étaient séparées par une bande qui reçut seulement une pluie abondante : sa plus grande largeur était de sept lieues et demie, sa plus petite trois lieues, et sa largeur moyenne cinq lieues et un quart.

À l'orient de la bande orientale et à l'occident de la bande occidentale, il y eut aussi beaucoup de pluie, mais dans une largeur qui n'a pas été déterminée.

Ces bandes sent un peu ondulées, mais leur direction générale court du sud-ouest au nord-est. Une ligne droite tirée d'Amboise à Malines forme à

peu près le milieu de la bande orientale, et une autre ligne droite tirée de l'embouchure de l'Indre dans la Loire jusqu'à Gand, forme à peu près le milieu de la bande occidentale.

Sur cette longueur, qui est de plus de cent lieues pour chaque bande, il n'y eut aucune interruption dans l'orage; et même d'après des renseignements précis on peut conclure qu'il couvrit encore plus de cinquante lieues au sud et cinquante lieues au nord, ce qui donna à chaque bande une longueur totale de plus de deux cents lieues; la lieue est de 2300 toises.

Dans cette immense étendue, tous les points ne furent pas frappés à la fois, mais on reconnut par la comparaison des heures que l'orage avait une marche très rapide, depuis les Pyrénées, où il semble avoir pris naissance, jusque dans la Baltique, où l'en en perdit la trace.

Sa vitesse était de seize lieues et demie à l'heure. On peut même constater qu'elle fut à peu près la même sur la bande orientale et sur la bande occidentale, comme on en peut juger par le tableau suivant.

Bande occidentale.

Grêle à	6 h. 1/2 du matin,	à Loches en Touraine.
à	7 h. 1/2	auprès de Chartres.
à	8 h.	à Rambouillet.
à	8 h. 1/2	à Pontoise.
à	9 h.	à Clermont en Beauvoisis.
à	11 h.	à Douai.
à	12 h. 1/2	à Courtray.
à	1 h. 1/4	à Flessingue.

Bande orientale.

Grêle à	7 h. 1/2 du matin	à Artenay, près d'Orléans.
à	8 h.	à Andonville, en Brécée.
à	8 h. 1/2	au faubourg Saint-Antoine, à Paris.
à	9 h. 1/2	à Crespy, en Valois.
à	11 h.	à Château-Cambresis.
à	2 h. 1/2	à Utrecht.

On voit que le nuage de la bande orientale avait un peu d'avance sur celui de la bande occidentale.

Dans chaque lieu la grêle ne tomba que pendant 7 à 8 minutes.

Les grêlons n'avaient pas tous la même forme; les uns étaient ronds, les autres longs et armés de pointes; les plus gros pesaient 8 onces.

Le nombre des paroisses dévastées fut en France de mille trente-neuf; le dommage qu'elles éprouvèrent fut, par une enquête officielle, évalué à 24,690,000 francs.

Ce phénomène est parmi tous les phénomènes connus l'exemple le plus prodigieux, et des puissances qui agissent pour rassembler la vapeur d'eau et pour la maintenir suspendue dans les airs, et des puissances qui agissent pour produire au milieu des chaleurs de l'été un refroidissement subit dans diverses régions de l'atmosphère.

Après avoir fait connaître ce que l'on sait des effets de la grêle et de leur intensité, nous essaierons maintenant de préscuter en peu de mots les opinions qui ont été émises sur leurs causes. Pour expliquer la grêle, il n'y a que deux difficultés, mais elles sont grandes, et nous pouvons le dire d'avance, elles restent au-dessus de tous les efforts qui ont été faits pour les résoudre.

Il s'agit de savoir d'abord comment se produit le froid qui congèle l'eau, et ensuite comment un grêlon qui a acquis assez de volume pour tomber par son poids, reste encore suspendu dans les airs pendant tout le temps qu'il lui faut encore pour arriver à un volume de 12 à 15 pouces de circonférence.

Sur la première question, Volta avait pensé que les rayons solaires, en frappant la surface supérieure d'un nuage très dense, sont absorbés presque en totalité, qu'il en résulte une très rapide évaporation, et que c'est cette évaporation qui produit assez de froid pour congeler l'eau. Mais l'on pouvait dire, et c'est, je crois, M. Bellani qui l'a dit le premier, on pouvait dire que quand un liquide s'évapore par la chaleur, soit par la chaleur reçue au contact, soit par la chaleur rayonnante, son évaporation ne peut devenir plus rapide qu'à la condition que sa température devienne plus haute, on en d'autres termes, qu'un liquide ne peut pas à la fois recevoir plus de chaleur, et par cette chaleur elle-même se refroidir davantage sans qu'il intervienne une autre cause.

Si l'on expose, par exemple, deux feuilles de papier également humides, l'une à l'ombre et l'autre au soleil, celle-ci sans doute séchera plus vite : elle aura une évaporation plus grande, mais aussi elle s'échauffe davantage. L'opinion de Volta, malgré l'autorité d'un si grand nom, ne sembla pouvoir être soutenue ni par le raisonnement ni par l'expérience.

On a dit ensuite, mais très vaguement, que le froid est produit par le vent. Cette idée mérite considération. Nous avons vu qu'il y a en effet des vents qui sont toujours accompagnés d'un refroidissement plus ou moins grand; ce sont ceux que nous avons caractérisés en les appelant *vents d'aspiration*. Le fait prouve qu'ils peuvent produire sur la terre un abaissement de 12°, et il n'y a aucun doute que dans les régions élevées ils ne puissent produire un refroidissement plus grand. Les météorologistes doivent donc porter leur attention sur ce point, afin de constater si les vents qui portent les nuées de grêle sont ou ne sont pas des vents d'aspiration. Si le froid qui porte les grêlons n'a pas cette origine, le problème reste entier : il faut chercher d'autres voies pour la résoudre.

Sur la seconde question, Volta avait proposé une théorie qui a eu une grande célébrité, et qui est en effet très ingénieuse. En admettant que les noyaux des grêlons soient formés, et qu'il existe un froid suffisant pour les grossir, Volta suppose que deux

vastes nuages chargés d'électricité contraires soient disposés l'un au-dessus de l'autre, alors les grêlons, encore très petits, tombant sur le nuage inférieur, y éprouveront deux effets : 1° en pénétrant à une certaine profondeur, ils se couvriront d'une nouvelle couche de glace, parce que la température est très basse; 2° ils s'électriseront de l'électricité même du nuage, et seront repoussés par lui en même temps qu'ils seront attirés par le nuage supérieur. Ainsi, remontant contre leur propre poids, ils arriveront au nuage supérieur, où ils éprouveront deux effets analogues, puis retombant de nouveau dans le nuage inférieur, ils seront de nouveau repoussés dans le nuage supérieur, et pourront ainsi faire la navette un très grand nombre de fois, exactement comme le représente l'expérience que nous avons rapportée (370). Mais bientôt, soit que les grêlons deviennent trop lourds, soit que les nuages perdent leur électricité, ou se trouvent emportés par les vents à des distances trop grandes, la cause qui maintient la grêle suspendue au milieu des airs sera insuffisante, et on la verra tomber instantanément presque en masse.

Volta essayait même d'indiquer les causes qui peuvent déterminer la formation de deux nuages superposés et chargés des électricités contraires; il la trouvait : 1° dans la propriété qu'il attribuait aux rayons solaires de déterminer une prompte évaporation; 2° dans la propriété qu'il attribuait aux vapeurs de s'électriser négativement en se formant, et positivement en se condensant; d'après ces hypothèses, il concevait qu'au-dessus d'un gros nuage frappé par le soleil, s'élève une colonne de vapeur élastique chargée de la même électricité que le nuage, et que cette vapeur une fois arrivée à une région assez haute et par conséquent assez froide pour se condenser, se condense en effet pour former un nouveau nuage chargé d'électricité contraire. Ces hypothèses sont inadmissibles, mais comme il est constant, par le fait, que les nuages orageux sont tantôt positifs et tantôt négatifs, et comme le mouvement de va et vient des grêlons repose seulement sur ce fait, il reste à examiner s'il est possible en lui-même. Or, on a fait beaucoup d'objections contre cette possibilité : plusieurs sont mal fondées, mais les deux suivantes me semblent d'un grand poids.

1°. Comment se peut-il qu'une puissance électrique qui n'exerce pas son action d'une manière brusque et instantanée soit capable d'enlever un bloc de glace d'une demi-livre? Comment se fait-il que l'étincelle ne parte pas entre ce bloc et le nuage (387)? Tout semble indiquer qu'il faudrait pour cela des propriétés électriques différentes des propriétés communes.

2°. Si les deux nuages superposés sont fortement électrisés comme ils doivent l'être pour enlever des masses pesantes, et si les grêlons font la navette dans l'espace qui les sépare, comment se fait-il que l'électricité ne s'écoule pas subitement d'un

nuage sur l'autre ? Les grêlons ne forment-ils pas entre les nuages une espèce de chaîne de communication qui favorise à un haut degré l'explosion de l'éclair, comme on le voit dans l'expérience elle-même que l'en fait pour imiter la grêle avec des balles de sureau ?

Si ces objections ne détruisent pas la théorie de Volta, elles peuvent du moins la mettre en doute, et prévenir les observateurs qu'il y a encore quelque chose à chercher pour avoir sur ce point toute la vérité.

À côté de la théorie de Volta s'en présente une autre : on peut supposer que le refroidissement étant produit par le vent, c'est aussi la puissance du vent qui entraîne les grêlons horizontalement ou au moins très obliquement dans l'atmosphère ; qu'ils parcourent ainsi quinze ou vingt lieues, et qu'ils n'ont pas besoin d'être suspendus bien longtemps au milieu des nuages très denses et très refroidis pour atteindre le volume énorme qu'ils ont quelquefois. Ainsi ce serait une même cause qui déterminerait la formation et l'accroissement de la grêle. Quant à l'électricité qui accompagne toujours ce phénomène, elle serait un effet et non pas une cause : il est impossible que l'accumulation de vapeur qui est nécessaire pour engendrer la grêle puisse se faire sans un grand dégagement d'électricité, puisque tous les nuages qui viennent se condenser au foyer même où se forme la grêle, y viennent avec une électricité positive ou négative qui acquiert une grande tension par la condensation.

On voit donc, en dernier résultat, que le phénomène de la grêle est encore enveloppé d'une grande obscurité, et qu'il faut encore de bonnes et nombreuses observations pour l'expliquer dans tous ses détails.

Nous pourrions nous dispenser de parler ici de l'invention des paragrêles, car assurément ce n'est pas une invention scientifique ; mais puisqu'en en a fait quelque bruit dans ces dernières années, il ne sera pas tout-à-fait hors de propos de dire en quoi ils consistent. On prend une perche de 20 ou 30 pieds de haut, on l'arme d'une pointe de cuivre ou de fer à l'une de ses extrémités, et en la fiche en terre verticalement par son autre extrémité ; ordinairement un fil de métal ou une corde de paille descend depuis la pointe jusqu'à la base de

la perche. Voilà ce que l'on appelle un paragrêle ; on en met quelques milliers de distance en distance au milieu des campagnes, et l'on suppose que la grêle ne pourra ni se former dans le ciel ni dévaster la terre. Voyons ce que la science nous apprend sur les effets que peuvent produire de tels instruments.

Tous les faits connus sur la météorologie électrique nous conduisent à cette conséquence, qu'il est fort douteux que l'électricité des nuages soit la cause de la grêle, et même qu'il est fort douteux que l'électricité des nuages soit une condition sans laquelle la grêle ne puisse pas avoir lieu. Tous les faits connus sur les propriétés des conducteurs nous conduisent encore à cette autre conséquence, que des instruments construits comme les paragrêles sont d'une impuissance absolue pour neutraliser l'électricité des nuages, en supposant même qu'ils fussent répandus partout, qu'ils couvrirent toute l'étendue des plaines et des montagnes, toute l'étendue des continents et des mers. Après cela, si quelqu'un vient avec ces instruments proposer de garantir, contre les atteintes de la grêle, la propriété d'une commune ou même d'une province, il est évident qu'il n'a pas consulté les résultats de la science ; car il aurait pu faire le raisonnement suivant : si l'électricité est la cause de la grêle, les paragrêles ne peuvent rien pour l'empêcher, et si l'électricité n'est pas la cause de la grêle, les paragrêles ne servent à rien.

C'est dans ce sens qu'il est permis de dire que l'invention des paragrêles n'est pas une invention scientifique.

Cependant il faut reconnaître le rôle désintéressé avec lequel plusieurs personnes estimables se sont empressées d'élever des paragrêles et d'en couvrir de vastes cantons. Si leur entreprise n'a pas été conseillée par la science, elle a été conseillée par un sentiment généreux, par le désir d'être utile ; et certes, lorsqu'on voit des pays dévastés, lorsqu'on voit la misère et les malheurs qui suivent les ravages de la grêle, on est bien vivement porté à tout tenter contre ce fléau pour en affranchir l'humanité. Le hasard a souvent produit de grandes choses ; des entreprises qu'un savant n'aurait ni faites ni proposées ont plus d'une fois été couronnées de succès, et tout ce que nous pouvons souhaiter ici, c'est que l'entreprise des paragrêles soit du nombre.

CHAPITRE VI.

DE L'ÉQUATEUR MAGNÉTIQUE ET DE L'INFLUENCE DES AUBORES SUR L'AIGUILLE AIMANTÉE.

687. Le magnétisme de la terre donne naissance à un grand nombre de phénomènes différens dont nous avons donné une première idée en parlant du magnétisme (liv. III, chap. 2). Mon intention avait été d'abord de rapporter ici toutes les observations relatives à ces phénomènes et de les discuter en détail, pour compléter, autant que possible, la partie de mon ouvrage qui comprend les élémens de météorologie; mais ce travail a pris beaucoup trop d'étendue; il m'a été impossible de le renfermer dans les limites que comporte un traité élémentaire. Me trouvant ainsi dans l'obligation de faire un choix, il m'a semblé convenable de donner la préférence aux questions qui se rapportent à l'équateur magnétique et aux aurores boréales. Ces questions sont en même temps les plus intéressantes et celles sur lesquelles on a recueilli jusqu'à ce jour les données les plus satisfaisantes et les plus décisives.

De l'équateur magnétique. — L'équateur magnétique est la ligne *sans inclinaison*; nous avons déjà indiqué (299) que cette ligne irrégulière fait le tour de la terre en restant toujours dans la zone équatoriale; elle coupe l'équateur terrestre en plusieurs points, et ne paraît pas s'en écarter au nord et au sud de plus de 15 ou 16 degrés. La *planche 33*

représente la trace de l'équateur magnétique; c'est une carte qui a été dressée avec des soins infinis et avec une très grande exactitude par le capitaine Duperrey, commandant de l'expédition dans le voyage autour du monde, fait par ordre du gouvernement, pendant les années 1822, 1823, 1824 et 1825. On peut suivre sur cette carte la route du bâtiment que commandait M. Duperrey, et voir les points où les observations ont été faites, soit pendant les relâches, soit pendant la traversée. Pour faciliter cet examen, nous rapporterons dans les trois tableaux suivans les résultats directs des observations qui ont servi à déterminer les divers points de l'équateur magnétique: le tableau n° 1 contient les observations de M. Duperrey; les tableaux n° 2 et n° 3 contiennent quelques observations du capitaine Sabine et de M. Jules de Blosserville.

Le signe + indique que l'*extrémité nord* de l'aiguille était *au-dessous* de la ligne horizontale, c'est-à-dire que l'inclinaison était observée au nord de l'équateur magnétique.

Le signe — indique, au contraire, que l'*extrémité nord* de l'aiguille était *au-dessus* de la ligne horizontale et qu'en conséquence l'inclinaison était observée au sud de l'équateur magnétique.

TABLEAU N° 1.

Position de l'équateur magnétique, conclue des observations de l'inclinaison de l'aiguille aimantée, faites dans la campagne de la corvette de S. M. la *Coguille*, pendant les années 1822, 1823, 1824 et 1825; par L. J. Duperrey, commandant de l'expédition.

Nota. Les reliques de l'expédition sont comprises entre deux lignes parallèles.

PAROISSE où les inclinaisons ont été observées.	DATE.	POSITION du lieu des observations.		OBSERVATIONS.	VARIATIONS moyennes.		LATITUDE magnétique.	POSITION OBSERVÉE de l'équateur magnétique.	
		Latitude.	Longitude.		Longitudes.	Longitudes.			
Océan atlantique équatorial.	1873								
Sept.	12	2. 18. 14" N.	35. 1. 40" O.	12. 37" N. O.	+ 37. 38" S.	17. 37. 0" N.	10. 48. 48" S.	73. 42. 55" O.	
	13	0 15. 30	31. 48. 35	13. 40	7. 49. 41. 4	10. 8. 56	10. 7. 38	73. 4. 21	
	14	4. 08. 2	33. 37. 56	13. 40	10. 33. 4	10. 37. 37	10. 57. 39	73. 34. 4	
	15	1. 37. 37	35. 40. 42	13. 40	16. 16. 1	2. 21. 0	11. 57. 27	73. 37. 34	
	16	4. 35. 57	28. 4. 4	13. 40	15. 15. 7	7. 48. 8	11. 50. 43	74. 22. 16	
	17	1. 37. 37	35. 40. 42	13. 40	11. 1. 70	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
	18	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
	19	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
	20	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
Pasé au sud de l'équateur magnétique.	21	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
	22	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
	23	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
	24	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
Océan atlantique central.	25	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
	26	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
	27	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
	28	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
	29	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
	30	11. 50. 43	26. 48. 36	13. 40	1. 37. 37	1. 37. 37	11. 50. 43	73. 4. 21	
Santa Catharina.	9-30	17. 35. 23	51. 0. 40	4. 38. 2	- 27. 33. 6	11. 35. 20	15. 34. 47	49. 92. 40	
Grand Océan équatorial.	1873.								
En vue de l'île San-Gallien.	12	10. 43. 42	72. 1. 32	2. 47	- 20. 11. 5	10. 31. 13	2. 30. 13	77. 10. 48	
	13	16. 31. 35	72. 1. 32	2. 47	- 13. 30. 2	7. 31. 40	2. 36. 11	77. 10. 28	
Calbe.	22	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	23	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	24	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	25	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	26	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	27	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	28	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	29	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	30	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
Pasé au nord de l'équateur magnétique.	31	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	32	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	33	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	34	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	35	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	36	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	37	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	38	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	39	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
	40	11. 5. 16	72. 1. 32	2. 47	- 9. 35. 7	4. 40. 52	2. 45. 37	78. 35. 52	
Pays.	53-59	6. 9. 4	63. 37. 28	9. 55. 6	+ 4. 5. 7	2. 2. 0 N.	7. 7. 38	83. 51. 38	
Pasé au S. de l'équateur magnétique.	24	8. 72. 46 S.	86. 1. 32	10. 48	- 8. 31. 3	0. 71. 30 S	8. 37. 54	85. 54. 33	
	25	2. 53. 11	87. 31. 35	10. 48	- 8. 10. 4	1. 31. 31	8. 36. 41	87. 11. 36	
	26	18. 6. 52	102. 7. 0	8. 0	- 27. 34. 3	13. 30. 3	8. 6. 01	98. 9. 6	
	27	17. 56. 47	103. 38. 56	2. 4	- 27. 16. 0	11. 35. 47	1. 47. 8	102. 46. 38	
	28	17. 58. 29	108. 37. 0	2. 43	- 27. 28. 0	11. 55. 47	2. 18. 18	104. 50. 48	
	29	16. 41. 0	115. 13. 21	2. 42	- 27. 35. 0	11. 55. 45	1. 19. 97	114. 51. 14	
	30	16. 41. 0	115. 13. 21	2. 42	- 27. 35. 0	11. 55. 45	2. 16. 34	124. 53. 7	
	31	16. 53. 23	127. 37. 57	2. 40	- 27. 33. 7	13. 45. 36	2. 43. 0	130. 97. 41	
En vue de l'île Clermont-Tonnerre.	51	15. 38. 41	137. 6. 36	4. 41	- 30. 11. 0	16. 50. 40	7. 41. 71	156. 91. 2	
Taiti.	9-11	17. 79. 11	151. 40. 18	2. 40. 4	- 30. 2. 0	16. 8. 0	1. 38. 05	149. 39. 34	
En vue des îles de Santa-Cruz.	1	10. 32. 0	162. 37. 4 R.	2. 42	- 28. 47. 0	13. 36. 34	3. 0. 32 N	168. 9. 16 R.	
	2	10. 32. 0	157. 6. 7	2. 42	- 28. 47. 0	13. 37. 37	2. 38. 23	158. 37. 18	
	3	2. 38. 40	158. 40. 1	2. 42	- 28. 47. 0	10. 35. 70	2. 1. 35	154. 52. 9	
Fort Franklin.	53-59	4. 40. 48	158. 38. 32	2. 46. 5	- 20. 40. 1	10. 40. 10	9. 40. 48	151. 44. 43	
En vue des îles Schomberg et de la Nouvelle-Guinée.	12	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 17. 38. 0	7. 39. 80	4. 36. 47	155. 45. 57	
	13	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 17. 38. 0	9. 12. 6	4. 4. 00	153. 33. 31	
	14	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	15	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	16	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	17	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	18	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	19	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	20	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	21	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	22	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	23	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	24	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	25	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	26	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	27	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	28	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	29	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	30	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	31	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	32	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	33	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	34	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	35	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	36	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	37	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	38	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	39	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	40	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	41	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	42	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	43	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	44	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	45	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	46	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	47	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	48	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	49	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	50	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	51	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	52	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	53	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	54	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	55	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	56	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	57	2. 37. 40	158. 38. 41	2. 40	- 18. 46. 0	9. 16. 20	6. 00. 43	153. 11. 41	
	58								

PAROISSE où les observations ont été observées.	DATE.	POUR du lieu des observations.		OBSERVATION.	OBSERVATION moyenne.	LIGNES magnétique.	POUR de l'équateur magnétique.	
		Latitude.	Longitude.				Latitude.	Longitude.
Basse d'Offik.	8-11	0. 1. 47. 3.	126. 37. 38 E.	1. 4. 78. 8.	-13. 34. 3	6. 55. 0 S.	6. 51. 6' N.	126. 30. 4' E.
Gaïli.	28	1. 22. 33	126. 46. 0	0. 31. 8	-20. 5. 4	10. 33. 30	7. 0. 33	126. 43. 47
Amboin.	11-12	0. 31. 41	125. 50. 5	0. 28. 0	-20. 33. 3	10. 36. 40	6. 58. 58	125. 55. 13
En vue des Iles Coral et Saint-Augustin. Grand Océan équatorial.	1824.	0. 45. 35	127. 5. 35	10. 31	-18. 35. 3	8. 37. 45	0. 38. 6 S.	126. 36. 38
	7	0. 30. 41	174. 33. 33	8. 40	-12. 11. 3	1. 33. 30	0. 8. 33 N.	125. 35. 10
	11	0. 32. 48	127. 52. 25	8. 5	-17. 35. 4	8. 17. 0	0. 8. 3 S.	174. 33. 31
	12	0. 0. 40	133. 35. 55	9. 0	-10. 3. 3	1. 2. 5	1. 2. 35 N.	174. 6. 38
	13	0. 32. 17	127. 52. 51	2. 50	-8. 38. 1	3. 00. 40	0. 40. 13	127. 52. 53
	15	0. 34. 22	127. 52. 0	2. 50	-8. 38. 1	3. 00. 40	0. 40. 13	127. 52. 53
	16	0. 34. 22	127. 52. 0	2. 50	-8. 38. 1	3. 00. 40	0. 40. 13	127. 52. 53
	17	0. 34. 22	127. 52. 0	2. 50	-8. 38. 1	3. 00. 40	0. 40. 13	127. 52. 53
	18	0. 34. 22	127. 52. 0	2. 50	-8. 38. 1	3. 00. 40	0. 40. 13	127. 52. 53
	19	0. 34. 22	127. 52. 0	2. 50	-8. 38. 1	3. 00. 40	0. 40. 13	127. 52. 53
En vue des Iles Gilbert. En vue de l'île Hall. Passé au N. de l'équa- teur magnétique.	11	0. 41. 32 N.	127. 5. 3	8. 2	-3. 20. 1	1. 42. 2	0. 51. 16 N.	127. 41. 41
	16	0. 52. 35	128. 48. 55	8. 40	-8. 31. 3	0. 33. 40	1. 8. 28	128. 41. 30
	19	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
	20	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
	21	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
Oulan, (Des Carolines.)	6-7	1. 31. 33	180. 40. 33	2. 50. 4	+ 2. 30. 3	1. 35. 30	3. 47. 20	180. 25. 10
	20	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
En vue de l'île Hogaleu. Passé au S. de l'équa- teur magnétique.	20	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
	21	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
	22	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
	23	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
	24	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
	25	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
	26	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
	27	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
	28	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
	29	1. 33. 45	170. 35. 44	10. 15	+ 1. 47. 3	0. 56. 45 N.	0. 57. 8	170. 49. 37
Doré.	29-30	0. 51. 50 S.	121. 45. 7	1. 36. 6	-44. 35. 6	7. 25. 0	0. 38. 0	121. 47. 30
	23	8. 11. 0	119. 39. 3	1. 0	-24. 2. 1	12. 35. 10	6. 23. 3	119. 52. 13
Seurabaya.	6-9	7. 12. 31	119. 33. 2	0. 10. 5 N. O.	-28. 38. 5	15. 5. 0	6. 33. 20	119. 35. 35
Ordon atterique équi- noriale	14	5. 30. 38	109. 45. 17	3. 0	-23. 41. 6	12. 22. 40	6. 41. 10	106. 22. 31
	28	70. 33. 8	2. 38. 30 O.	11. 50	-35. 45. 7	13. 32. 50	7. 31. 2 S	2. 38. 3. 0
De Sainte-Hélène.	1823. 9-12	15. 35. 0	8. 2. 55	19. 35. 5	-23. 5. 2	1. 30. 50	8. 42. 4	10. 50. 16
Passé au N. de l'équa- teur magnétique.	15	12. 6. 25	11. 9. 28	18. 45	-8. 07. 3	4. 35. 12	8. 57. 17	12. 35. 51
	16	12. 46. 31	12. 46. 31	18. 40	-8. 4. 17	1. 33. 16	2. 19. 28	12. 49. 13
	17	12. 43. 46	12. 43. 46	18. 20	+ 0. 1. 0	0. 0. 57 N.	0. 44. 45	12. 43. 45
	18	12. 43. 46	12. 43. 46	17. 0	+ 2. 17. 5	1. 8. 28	0. 44. 45	12. 43. 45
De de l'Ascension.	15-24	7. 55. 10	16. 44. 36	18. 33. 3	+ 1. 58. 3	0. 38. 0	8. 51. 37	16. 37. 10

TABLEAU N° II.

Position de quelques points de l'équateur magnétique, conclue des observations de l'inclinaison de l'aiguille aimantée, faites dans l'Océan atlantique pendant l'année 1822, par le capitaine *Eduard Sabine*.

PAROISSE où les inclinaisons ont été observées.	DATE.	POSITION du lieu des observations.		DÉCLINAISON moyenne.	LATITUDE magnétique.	POSITION GÉOMÉTRIQUE de l'équateur magnétique.	
		Latitude.	Longitude.			Latitude.	Longitude.
Île Saint-Thomas.	1822. Mars.	0° 24' 45" N.	4° 24' 23" E.	+	0° 2' 0" S.	0° 24' 45" N.	4° 24' 4" E.
Île de l'Ascension.	Juin.	7° 35' 30" S.	19° 44' 38" O.	16° 57' N. O.	+ 5° 10' 0" 2 N.	19° 33' 50" S.	15° 58' 44" O.
Bahia.	Juillet.	12° 39' 31"	40° 53' 33"	2° 0"	+ 4° 12' 0" 2, 6. 10	15° 9' 29"	40° 45' 52"
Marmham.	Août.	2° 34' 43"	49° 41' 48"	1° 37' N. E.	+ 23° 6' 0" 12. 2. 30	14° 54' 0"	49° 54' 30"

TABLEAU N° III.

Position de quelques points de l'équateur magnétique, conclue des observations de l'inclinaison de l'aiguille aimantée, faites dans la mer des Indes, pendant les années 1827 et 1828, par M. *Jules de Blaisville*, officier de la marine royale.

PAROISSE où les inclinaisons ont été observées.	DATE.	POSITION du lieu des observations.		DÉCLINAISON.	INCLINAISON moyenne.	LATITUDE magnétique.	POSITION GÉOMÉTRIQUE de l'équateur magnétique.	
		Latitude.	Longitude.				Latitude.	Longitude.
Calcutta.	1827.	22° 33' 56" N.	86° 0' 35" E.	2° 38' N. E.	+ 20° 31' 9"	14° 1' 35" N.	6° 35' 2" N.	85° 40' 52" E.
Chanderagong.	id.	13° 51' 30"	85° 58' 30"	2° 39' 9"	+ 29° 47' 0"	9° 54'	9° 42' 30"	85° 17' 0"
Karikal.	1828.	10° 35' 0"	77° 53' 0"	5° 14' 0"	+ 1° 51' 3"	0° 55' 35"	9° 59' 19"	77° 31' 35"
Trinquemalay.	id.	6° 31' 31"	78° 51' 10"	5° 9' 0"	- 2° 34' 6"	1° 19' 31" S.	9° 51' 11"	78° 52' 55"
Johannapour.	id.	9° 46' 0"	77° 40' 35"	5° 19' 0"	- 0° 39' 9"	0° 19' 53"	9° 59' 52"	77° 43' 20"
Aripou.	id.	9° 48' 15"	77° 31' 0"	5° 19' 0"	- 2° 47' 9"	1° 0' 49"	9° 57' 1"	77° 37' 51"
Chagouat.	id.	9° 46' 35"	77° 54' 0"	5° 16' 0"	- 1° 54' 9"	0° 15' 37"	10° 4' 51"	77° 58' 34"
Beauvia.	id.	9° 9' 0" S.	90° 39' 45"	0° 31' 1"	- 25° 55' 6"	15° 39' 50"	7° 30' 54"	100° 24' 6"
Île Koiper.	id.	6° 2' 15"	104° 31' 15"	0° 31' 1"	- 35° 31' 7"	15° 29' 31"	7° 34' 7"	100° 18' 59"
Pondichery.	id.	11° 35' 40" N.	77° 32' 25"	5° 13' 0"	+ 5° 43' 5"	1° 41' 39" N.	10° 4' 3"	77° 29' 15"

Avant d'indiquer comment l'on a obtenu les divers nombres de ces tableaux, nous ferons remarquer que l'équateur magnétique ne coupe l'équateur terrestre qu'en deux seuls points qui sont presque diamétralement opposés, l'un se trouvant près de l'île Saint-Thomas, non loin du méridien de Paris, et l'autre à peu près entre les îles Carolines et les îles Sandwich, à environ 180° de longitude. Ces points, si importants pour la théorie du magnétisme terrestre, se nomment les *nœuds* de l'équateur magnétique; leur position précise est pour le premier 3° 20' de longitude orientale, et pour le second 185° 30' de longitude occidentale. Entre les nœuds, à l'occident du méridien de Paris, l'équateur magnétique est dans l'hémisphère austral; il y prend des latitudes rapidement croissantes en traversant l'Océan Atlantique, s'approche de l'île Saint-Hélène, repasse au delà de l'île de l'Ascension qu'il laisse au nord, et vient pénétrer dans le continent d'Amérique sur la côte du Brésil à 15° de latitude près de Saint-George-dos-Ilheos; à mesure qu'il avance dans les terres, il prend encore des latitudes australes un peu croissantes jusqu'à

Casybas, latitude 16°, qui paraît être le limite de son excursion vers le sud; ensuite il se rapproche de l'équateur terrestre, et vient sortir du continent sur la côte du Pérou, près de Truxillo, à 8° seulement de latitude australe; à partir de là, sa marche paraît beaucoup plus régulière dans le grand Océan équinoxial; il se rapproche graduellement de l'équateur terrestre jusqu'au second nœud. Là il passe dans l'hémisphère boréal, où sa marche n'est connue, par des observations récentes, que dans une très petite portion de son cours, depuis le nord jusqu'à Bornéo, par M. Duperrey, et de Bornéo à la pointe de Ceylan, par M. de Blaisville. On ne sait rien sur la véritable direction qu'il prend dans l'intérieur de l'Afrique; mais quelques observations plus anciennes semblent indiquer qu'il s'étend assez régulièrement depuis le détroit de Bab-el-Mandeb, à l'entrée de la mer Rouge, jusqu'à l'île Saint-Thomas où le capitaine Sabine fixe son premier nœud.

Nous allons indiquer maintenant les méthodes que l'on emploie pour déterminer la trace de l'équateur magnétique sur la terre, et pour assigner les

longitudes et les latitudes géographiques de ses divers points.

1^o. A chaque station soit sur terre, soit à la mer, on détermine la longitude et la latitude géographiques, et ensuite on observe la déclinaison et l'inclinaison comme nous l'avons indiqué (livre III, chap. 3); seulement, à la mer, on est souvent obligé de se contenter d'une seule observation d'inclinaison.

2^o. Quand l'inclinaison obtenue dans une station donnée ne dépasse pas 30 degrés, l'on admet que la moitié de la tangente de cette inclinaison est égale à la tangente de la latitude magnétique. Ainsi, en désignant par i l'inclinaison et par m la latitude magnétique, on admet que ces deux angles i et m sont liés entre eux par la relation

$$\text{Tang. } m = \frac{\text{tang. } i}{2}.$$

Co qui permet de calculer m quand on a observé i .

La latitude magnétique d'une station est comptée sur le méridien magnétique de cette station; c'est l'arc de ce méridien compris entre la station elle-même et l'équateur magnétique.

Ayant donc calculé m par la formule précédente au moyen de la valeur i de l'inclinaison observée, connaissant d'ailleurs la déclinaison du lieu ou la trace du méridien magnétique, il suffit de compter sur ce méridien, en le prolongeant vers l'équateur magnétique, un arc qui soit égal à la valeur de m . L'autre extrémité de cet arc sera le point correspondant de l'équateur magnétique. Il est facile de voir à présent comment l'on pourra en déterminer la position et la latitude géographiques.

Les lignes ponctuées que l'on voit sur la carte, entre l'équateur magnétique et la route de la corvette *la Coquille*, sont précisément les latitudes magnétiques qui ont servi à trouver divers points de l'équateur magnétique; et elles sont par conséquent aussi les directions de la déclinaison pour chaque point correspondant de la route. On voit que les déclinaisons sont occidentales dans l'Océan atlantique; qu'elles deviennent orientales près du Rio de Janeiro, et qu'elles continuent d'être orientales jusque dans la mer de Java où elles commencent à être très faibles.

Cette construction graphique de l'équateur magnétique nous explique les irrégularités apparentes et les directions anguleuses qu'il semblerait affecter dans l'Océan atlantique, sur la côte occidentale de l'Amérique, et surtout près du douzième nord au milieu des îles Carolines. On voit que de petites erreurs dans l'inclinaison et dans la déclinaison d'un lieu peuvent encoeurir à déplacer sensiblement le point de l'équateur magnétique correspondant, et l'on conçoit combien ces erreurs sont faciles à commettre, ou plutôt combien elles sont inévitables dans les observations qui sont faites à la mer. Ce-

pendant les habiles observateurs parviennent à atténuer ces erreurs; pour s'en assurer il suffit de comparer les quatre points α , γ , ϵ et ν de l'équateur magnétique qui ont été déterminés par les observations du capitaine Sabino, dans l'Océan atlantique, α au nord de l'île Saint-Thomé, ν au sud de l'île de l'Ascension, ϵ auprès de la côte occidentale de l'Amérique et γ dans l'intérieur de ce continent, on sera frappé des petites différences qui existent entre les positions de ces points et celles qui ont été déterminées dans les mêmes parages par le capitaine Duperrey.

Le plus sûr moyen de figurer exactement l'équateur magnétique, tel qu'il est aujourd'hui sur le globe, serait sans contredit, d'en suivre la trace sur les continents et sur les mers. Des voyages scientifiques entrepris uniquement dans ce but pourraient seuls résoudre cette grande question; et l'on peut espérer que le gouvernement français ne tardera pas à en offrir les moyens à nos savants voyageurs.

Wilke est le premier physicien qui se soit occupé de déterminer la trace de l'équateur magnétique (*Mém. de Stockholm*, 1768) avec les observations très imparfaites que l'on avait à cette époque; il trouva que l'équateur magnétique était un grand cercle de la sphère terrestre, incliné de 12° sur l'équateur.

M. de Humboldt détermina un grand nombre de points nouveaux dans son célèbre voyage en Amérique. Ces points sont rapportés sur la carte planche 33; on les a marqués du signe +; ils sont compris entre l'île Gallego et la côte occidentale de l'Amérique. C'est en discutant ces observations que MM. de Humboldt et Biot reconnurent d'abord l'inexactitude du cercle indiqué par Wilke, et parvinrent à une relation entre l'inclinaison et la latitude magnétique; cette relation, qui se présentait sous une forme compliquée, fut bientôt simplifiée par Bowditch, Melville et Kraft (*Mém. de Pétersbourg*, 1809), et réduite à la forme que nous avons indiquée :

$$\text{Tang. } m = \frac{\text{tang. } i}{2}$$

Cette relation est tout-à-fait empirique; en a reconnu en discutant les observations qu'elle les représente assez fidèlement lorsque l'inclinaison ne dépasse pas une trentaine de degrés. La difficulté qui se présente pour trouver une formule qui s'étende à de plus grandes inclinaisons et à de plus grandes latitudes magnétiques résulte sans doute des grandes variations de la déclinaison et par conséquent des cercles très diversement inclinés sur lesquels il faudrait compter les latitudes magnétiques.

Hansteen en 1819 construisit un autre équateur magnétique (planche 7 du grand Atlas magnétique); mais, par une faute de signe dans l'inclinaison ob-

servée par Cook à l'île de Noë, le 1^{er} janvier 1778, Hansteen fut conduit à une courbe très irrégulière et très inexacte pour la plus grande partie de l'Océan pacifique; il a depuis corrigé cette erreur dans les annales de Gilbert.

M. Norlet a aussi présenté à l'Institut deux mémoires sur ce sujet; dans le premier il a construit l'équateur magnétique en discutant des observations de Cook, Bayly d'Arimpe, Lacaille, etc.; dans le second, il construit l'équateur magnétique d'après les observations de MM. Duperrey et Sabine; et il arrive à cette conséquence qu'il avait déjà indiquée, savoir : que l'équateur magnétique a un mouvement de translation d'orient en occident. Mais l'on doit remarquer que c'est depuis un petit nombre d'années seulement que l'on sait observer l'inclinaison avec exactitude, et que toutes les observations antérieures au commencement de ce siècle sont très probablement affectées de quelque cause d'erreur, dépendant non pas de l'habileté de l'observateur, mais de l'imperfection de l'instrument lui-même et de l'imperfection des procédés d'observation. Les conséquences que l'on pourrait tirer, en comparant l'équateur actuel à cet équateur fondé sur d'anciennes observations, portent donc avec elles une très grande incertitude. C'est pour cette raison qu'il serait si important d'avoir enfin pour notre époque une carte exacte et complète de l'équateur magnétique; cette carte pourrait seule servir de point de départ pour des discussions qui ont un si haut degré d'intérêt dans la science, et qui pourraient aussi avoir leur utilité dans la navigation.

688. Des aurores boréales et de leur rapport avec l'aiguille aimantée.

Le phénomène des aurores boréales est assez rare dans nos climats, mais il devient plus fréquent à mesure que l'on s'avance vers le nord, et dans les hautes latitudes ses apparences sont si régulières et si permanentes que l'on peut dire avec raison que l'aurore boréale est le soleil des régions polaires. Les voyageurs qui ont visité ces parages, ou même les habitants du nord de l'Écosse, de la Norvège, de la Laponie, et des contrées septentrionales de l'Asie et de l'Amérique, racontent en effet que les aurores boréales répandent au loin une éclatante lumière, colorée des plus vives nuances, qu'une vaste étendue du ciel semble être en feu et que la terre elle-même en est resplendissante. Ce phénomène n'est pas rapide et passager comme la lumière de l'éclair; il se montre toujours pendant plusieurs heures, et souvent même il persiste pendant toute la durée des longues nuits de ces climats; son éclat cependant n'est pas calme et invariable comme celui des astres; on le compare à des flammes immenses qui se déploient dans les hautes régions du ciel, qui s'agitent dans tous les sens, se heurtent, s'éteignent et se raniment avec une prodigieuse rapidité. Un si grand spectacle qui imprime à la fois tant de terreur et d'admiration à

ceux qui le contemplant, ne pouvait manquer d'attirer l'attention des physiciens; on a tenté depuis long-temps de découvrir les conditions sous lesquelles l'aurore boréale prend le plus vif éclat et les apparences les plus complètes, et de remonter, autant que les données le permettent, à la véritable cause de ce phénomène. Nous allons essayer de donner une analyse de ce que la science a pu recueillir sur ce vaste sujet.

Il paraît que l'aurore boréale ne peut se développer complètement que quand le ciel est sans nuages, ou du moins quand il ne présente que ces vapeurs plus ou moins légères, que l'on voit en général à l'horizon et qui ne s'élèvent jamais à une grande hauteur.

Si l'aurore boréale doit paraître, on commence, après le chute du jour, à distinguer une lueur confuse vers le nord; bientôt des jets de lumière s'élèvent au-dessus de l'horizon; ils sont larges, diffus et irréguliers; on remarque en général qu'ils tendent vers le zénith. Après ces apparences, déjà très variées, qui sont comme le prélude du phénomène, on voit à de grandes distances deux vastes colonnes de feu, l'une à l'occident et l'autre à l'orient, qui montent lentement au-dessus de l'horizon et qui parviennent à une grande hauteur; pendant qu'elles s'élèvent avec des vitesses inégales et variables, elles changent sans cesse de couleur et d'aspect; des traits de feu plus vifs ou plus sombres en sillonnent la longueur ou les enveloppent tortueusement; leur éclat passe du jaune au vert foncé ou au pourpre étincelant. Enfin, les sommets de ces deux colonnes éblouissantes s'inclinent, se penchent l'un vers l'autre et se réunissent pour former un arc ou plutôt une voûte de feu d'une immense étendue. Quand l'arc est formé il se soutient majestueusement dans le ciel pendant des heures entières; l'espace qu'il enferme est en général assez sombre, mais d'instans en instans il est traversé par des lueurs diffuses et diversement colorées. Au contraire, dans l'arc lui-même on voit incessamment des traits de feu d'un vif éclat qui s'élancent au dehors, sillonnent le ciel verticalement comme des fusées étincelantes, passent au-delà du zénith et vont se concentrer dans un petit espace à peu près circulaire que l'on appelle la *couronne* de l'aurore boréale. Dès que la couronne est formée le phénomène est complet, l'ancre a déployé dans le ciel tous les plis de sa robe de feu, on peut la contempler dans toute sa majesté. Après quelques heures, ou d'autres fois après quelques instans la lumière s'affaiblit peu à peu, les fusées ou les jets deviennent moins vifs et moins fréquens, la couronne s'efface, l'arc devient languissant, et enfin l'on n'aperçoit plus que des lueurs incertaines qui se déplacent lentement et qui s'éteignent.

Telle est, au rapport des voyageurs, l'apparence de l'aurore boréale quand elle se montre dans sa plus grande magnificence; mais soit que l'état du ciel ou les circonstances atmosphériques ne soient

pas toujours favorables, soit que les conditions elles-mêmes qui déterminent le phénomène ne soient pas toujours satisfaites en même temps, il arrive très rarement que l'on puisse observer une aurore boréale complète, même dans les régions septentrionales. Tantôt la couronne ne se forme que d'une manière vague et incertaine, tantôt l'arc est incomplet ou multiple dans quelques points, tantôt enfin l'on aperçoit des nuages qui interceptent la lumière, qui se colorent sur leurs bords ou dans leur épaisseur et qui altèrent par mille accidents plus ou moins remarquables la forme régulière de l'aurore boréale. Alors on distingue encore vers le nord une lumière extraordinaire, mais le phénomène est confus et mal défini. On conçoit qu'il puisse offrir mille apparences plus ou moins étonnantes.

Nous avons décrit l'aurore boréale, comme si l'observateur la voyait vers le nord; mais il arrive souvent dans les hautes latitudes septentrionales que l'observateur voit l'aurore vers le sud par rapport à la station où il se trouve.

Nous n'avons parlé que de l'aurore boréale de l'hémisphère boréal; mais on a observé un phénomène tout-à-fait semblable dans l'hémisphère austral, et il n'y a aucun doute que vers le pôle sud de la terre il ne se produise aussi des aurores boréales ou si l'on veut des *aurores australes*.

Voici maintenant les rapports qui semblent exister entre les aurores boréales et le magnétisme.

1°. Le sommet de l'arc de l'aurore boréale se trouve toujours sur le méridien magnétique du lieu de l'observation; ou du moins il ne semble pas s'en écarter d'une manière sensible.

2°. La couronne de l'aurore boréale se trouve toujours sur le prolongement de l'aiguille d'inclinaison du lieu de l'observation. Aussi à Paris, si l'on observait une aurore boréale complète, la couronne irait se former vers le sud à 30° environ au delà du zénith, dans un plan vertical incliné de 22° au méridien terrestre.

Ces relations remarquables ont été indiquées depuis long-temps; mais il ne serait pas sans intérêt pour la science de les vérifier par des observations exactes, car il semble à peu près impossible qu'elles se confirment avec la même précision pour tous les observateurs qui regardent une même aurore boréale.

3°. L'aurore boréale dérange de leurs positions ordinaires l'aiguille d'inclinaison et l'aiguille de déclinaison, et elle produit ces dérangements même dans les lieux d'où elle ne peut être vue. Ainsi les aurores boréales polaires, qui ne peuvent en aucune manière être vues à Paris, affectent les aiguilles horizontales et verticales de l'Observatoire de Paris. En général, dès le matin du jour où l'aurore boréale doit se montrer dans quelques régions des pôles, l'aiguille de déclinaison de Paris se dévie à l'occident, et le soir elle se dévie à l'orient. Ces déviations s'élèvent souvent à 12 ou 15 minutes. C'est à M. Arago que l'on doit cette observation

fondamentale; il l'avait annoncée dès l'année 1836, depuis cette époque il tient un registre exact des dérangements qu'éprouvent les aiguilles de l'Observatoire, et il compare ensuite les instans de ces dérangements avec les observations d'aurores boréales qui sont faites aux États-Unis, en Écosse, en Norvège ou sur les différentes mers polaires par les navigateurs. On peut voir les résultats de ces comparaisons dans les numéros de décembre des *Annales de physique et de chimie*, on est frappé de la coïncidence parfaite qui existe entre l'apparition de l'aurore boréale dans quelques points du nord et le dérangement de l'aiguille de Paris; tellement que l'on est forcé de conclure avec M. Arago, que le dérangement de l'aiguille de Paris est un moyen sûr de prédire les aurores boréales qui se font voir aux Lapons, aux Groenlandais et à tous les habitants des régions polaires. M. Arago a essayé de voir si les *aurores australes* dérangeaient l'aiguille de Paris; mais jusqu'à présent les aurores australes dont on lui a communiqué les époques coïncidaient avec quelques aurores boréales; ainsi il n'y avait pas moyen de décider si les dérangements de l'aiguille venaient du pôle nord ou du pôle sud.

À l'exemple de M. Arago, plusieurs observateurs en Écosse, en Allemagne, en Russie, et même en Chine, suivent les mouvements de l'aiguille aimantée, et l'on peut espérer que dans peu d'années nous aurons des résultats précieux sur cette grande question.

Je voudrais pouvoir indiquer maintenant la cause des aurores boréales; mais la science ne possède à cet égard que des aperçus bien vagues: on sait à peine si les aurores boréales sont un phénomène atmosphérique. Voici cependant ce que l'on a pu recueillir sur ce sujet.

La plupart des voyageurs qui ont visité les régions septentrionales pour observer les aurores boréales ont voulu s'assurer si ce phénomène est accompagné de quelque bruit perceptible. Presque tous s'accordent à déclarer qu'ils n'ont jamais pu entendre du bruit, même pendant les aurores boréales les plus éclatantes; mais en même temps ils ajoutent qu'ils ont recueilli parmi les habitants de ces contrées des témoignages irréconciliables sur ce fait, et qu'ils sont obligés de croire que souvent les aurores boréales sont accompagnées d'un bruit ou d'un bruissement plus ou moins distinct, qu'ils ne peuvent comparer, d'après le récit unanime qu'on leur en a fait, qu'à des pétilemens semblables à ceux de l'étincelle électrique.

Si le fait du bruit de l'aurore boréale était constaté, seulement pour quelques cas particuliers, on pourrait conclure avec certitude que ce phénomène est produit dans l'atmosphère, car, hors de l'atmosphère, il n'y a point de bruit.

D'autres observateurs ont essayé de mesurer directement la hauteur des aurores boréales. Une série d'observations assez complète a été entreprise sur ce sujet pendant l'un des voyages du capitaine

Franklin par le lieutenant Robert Hood et le D^r Richardson.

Le premier de ces observateurs était établi à Cumberland-House :

Latitude.	53° 58' 4'' ;
Longitude.	102° 16' 41'' ouest ;
Déclinaison.	17° 17' 31'' est ;
Inclinaison.	83° 12' 51''.

Le second à *Basquieu-Hill* ou dans les environs. Plusieurs observations simultanées ont donné six à sept milles anglais d'élévation au-dessus de la terre pour les points de l'aurore boréale qui étaient observés. Il en résulterait donc que le phénomène serait produit dans l'atmosphère et même à une assez petite hauteur au-dessus de l'horizon. Il y a cependant une observation de M. Dalton qui ne s'accorderait pas avec cette conséquence. M. Dalton a calculé les dimensions d'une aurore boréale très remarquable qui fut vue à la fois, le 29 mars 1820, entre 8 et 10 heures du soir, à Manchester, à Édim-

bourg et dans d'autres lieux. L'illustre savant de Manchester trouve que le sommet de l'arc de cette aurore boréale s'élevait à 100 mille anglais (environ 33 lieues), que la largeur de l'arc était de 3 lieues, et que son amplitude de l'est à l'ouest était de 167 lieues. (*Ann. de phys. et de chim.*, t. 36, pag. 404, et *Trans. philosoph.*)

Ainsi des deux moyens qui se présentent pour reconnaître si l'aurore boréale est dans l'atmosphère, aucun n'a encore fourni jusqu'à présent des données incontestables.

On peut bien présumer que l'électricité atmosphérique répandue dans les hautes régions de l'air est la vraie cause des aurores boréales, comme le physicien Canton l'avait annoncé dès que l'on eut connaissance des phénomènes que présente le fluide électrique dans l'air dilaté. Mais il serait prématuré de discuter cette supposition ou de chercher à la développer avant que l'on ne soit parvenu par des observations décisives à démontrer que le phénomène des aurores boréales est véritablement un phénomène atmosphérique.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

Avertissement sur la première édition.
Avertissement sur cette deuxième édition.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

CHAP. I. — Des Phénomènes naturels. — De l'Espace. — Du Temps. — De la Matière. — Des Forces. — Du Mouvement. — De l'inertie.	
CHAP. II. — Propriétés générales des corps. — Divisibilité. — Porosité. — Compressibilité. — Élasticité. — Dilatabilité.	
CHAP. III. — De l'Équilibre et du Mouvement.	

LIVRE PREMIER.

DE LA PESANTEUR.

CHAP. I. — Des Effets de la Pesanteur et de sa direction.	
CHAP. II. — De la Chute des corps et des lois de la pesanteur.	
CHAP. III. — Du Centre de gravité. — De l'Équilibre des solides. — De la Balance. — Du Poids, de la masse et de la densité des corps.	
CHAP. IV. — Du Pendule, et de la figure de la terre.	
CHAP. V. — De l'Hydrostatique.	
CHAP. VI. — De l'Équilibre des gaz et des pressions atmosphériques.	
CHAP. VII. — De l'Équilibre des corps flottans, et des corps plongés dans les fluides.	
CHAP. VIII. — Principes de l'hydrodynamique et de l'hydraulique.	
CHAP. IX. — Du Mouvement des gaz.	

LIVRE DEUXIÈME.

DE LA CHALEUR.

Notions générales.

PREMIÈRE PARTIE.

Dilatation.

CHAP. I. — Construction du thermomètre à mercure.	
CHAP. II. — Formules de dilatation.	
CHAP. III. — De la Dilatation des gaz.	
CHAP. IV. — De la Dilatation absolue du mercure, et de la Dilatation apparente de quelques autres liquides.	
CHAP. V. — De la Dilatation des solides.	
CHAP. VI. — De la Densité des gaz, des liquides et des solides.	

CHAP. VII. — Des Échelles thermométriques. — Des Thermomètres de différentes espèces, et des pyromètres.	116
--	-----

DEUXIÈME PARTIE.

Changement d'État des Corps.

CHAP. I. — De la Fusion et de la solidification.	121
CHAP. II. — Des Vapeurs dans le vide.	123
CHAP. III. — Des Vapeurs mélangées avec les gaz.	132
CHAP. IV. — De l'Ébullition et de l'évaporation.	135

TROISIÈME PARTIE.

De la Communication du Calorique.

CHAP. I. — De la Conductibilité.	140
CHAP. II. — Du Calorique rayonné.	141
CHAP. III. — Des Lois de refroidissement.	146

QUATRIÈME PARTIE.

De la Mesure de la Chaleur, et des causes qui la produisent.

CHAP. I. — Calorique spécifique.	148
CHAP. II. — Calorique latent.	150
CHAP. III. — De la Chaleur de combinaison et de la chaleur animale.	154
CHAP. IV. — Sources de chaleur et de froid.	157

APPENDICE.

Construction des machines à vapeur.	160
-------------------------------------	-----

LIVRE TROISIÈME.

DE MAGNÉTISME.

CHAP. I. — De l'Action des aimans sur eux-mêmes et sur les substances magnétiques.	164
CHAP. II. — De l'Action magnétique de la terre.	168
CHAP. III. — Des Lois et de la théorie du magnétisme.	183
CHAP. IV. — Des Procédés d'aimantation, et des causes qui modifient la force coercitive.	186
CHAP. V. — Du Magnétisme en mouvement, et de quelques phénomènes singuliers d'attraction et de répulsion.	195

LIVRE QUATRIÈME.

DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAP. I. — Des Actions électriques.	207
CHAP. II. — De l'Électricité par influence.	201

CHAP. III. — Des Forces électriques.	205
CHAP. IV. — De l'Électricité dissimulée.	211
CHAP. V. — De la Lumière électrique.	217
CHAP. VI. — Du Mouvement des corps électrisés.	219
CHAP. VII. — Des diverses causes qui développent de l'électricité.	221
CHAP. VIII. — Électricité galvanique. — De l'électricité développée au contact.	225
CHAP. IX. — De la Pile de Volta.	227
CHAP. X. — Des Piles sèches.	228

LIVRE CINQUIÈME.

DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

CHAP. I. — De l'Action des courans sur les aimans.	242
CHAP. II. — De l'Action de la terre et des aimans sur les courans.	255
CHAP. III. — De l'Action des courans sur les courans.	260
CHAP. IV. — Phénomènes thermo-électriques.	266
CHAP. V. — Phénomènes électro-magnétiques.	270
CHAP. VI. — Des Phénomènes électro-chroniques.	273
CHAP. VII. — Des Poissons électriques.	275

LIVRE SIXIÈME.

DES ACTIONS MOLECULAIRES.

NOTIONS GÉNÉRALES.	279
CHAP. I. — Capillarité.	280
CHAP. II. — De la structure des corps.	291
CHAP. III. — De l'Élasticité.	295

LIVRE SEPTIÈME.

ACOUSTIQUE.

CHAP. I. — De la Production du son et de sa transmission dans l'air atmosphérique.	310
CHAP. II. — Évaluation numérique des sons par les vibrations des cordes, des tuyaux cylindriques, des lames et de la sirène.	315
CHAP. III. — Vibrations des cordes.	322
CHAP. IV. — Du mouvement de vibrations des masses fluides.	333
CHAP. V. — Des Vibrations dans quelques instrumens de musique.	337

CHAP. VI. — De la vitesse du son dans les différens milieux.	339
CHAP. VII. — De la voix et de l'ouïe.	343

LIVRE HUITIÈME.

OPTIQUE.

Notions générales sur la propagation de la lumière.	346
---	-----

PREMIÈRE PARTIE.

Lumière non polarisée.

CHAP. I. — De la catoptrique ou de la réflexion de la lumière.	352
CHAP. II. — Dioptrique ou réfraction de la lumière.	358
CHAP. III. — De la décomposition et de la recombinaison de la lumière.	375
CHAP. IV. — Des raies du spectre, de la dispersion et de l'achromatisme.	381
CHAP. V. — De la vision et des instrumens d'optique.	388
CHAP. VI. — De la diffraction et des interférences de la lumière.	404

LIVRE HUITIÈME. — SECONDE PARTIE.

CHAP. I. — De la double réfraction.	441
CHAP. II. — Phénomènes généraux de la polarisation.	450
CHAP. III. — Lois générales de la polarisation.	459
CHAP. IV. — Couleurs de la lumière polarisée.	466

ÉLÉMENTS DE MÉTÉOROLOGIE.

Avertissement.	483
----------------	-----

LIVRE NEUVIÈME.

MÉTÉOROLOGIE.

CHAP. I. — De la chaleur terrestre.	487
CHAP. II. — De l'air et des vents.	515
CHAP. III. — Des vapeurs et des substances météoriques qui tombent de l'atmosphère.	522
CHAP. IV. — De la lumière météorique.	539
CHAP. V. — De l'électricité atmosphérique.	546
CHAP. VI. — Du magnétisme terrestre.	562

5690772

3.1.334

3.4.134

1

MC



10/10/10

